



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LADITELNÝ KMITOČTOVÝ FILTR PRO LABORATORNÍ ÚČELY

THE TUNABLE FREQUENCY FILTER FOR LABORATORY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Dokoupil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Friedl, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Jakub Dokoupil
Ročník: 3

ID: 155510
Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Laditelný kmitočtový filtr pro laboratorní účely

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy univerzálních kmitočtových filtrů. Porovnejte výhody a nevýhody dostupných integrovaných obvodů a prostudujte možnosti jejich řízení. Navrhněte vlastní uspořádání univerzálního kmitočtového filtru řízeného pomocí mikrokontroléru pro laboratorní účely UTEE.

Realizujte hw řešení kmitočtového filtru a ověřte jeho parametry měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DOLECEK, J. Moderní učebnice elektrotechniky: Kmitočtové filtry, generátory signálu a převodníky dat. 1. vydání. Praha: BEN Technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-240-4.
- [2] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J. Kmitočtové filtry. 1. vyd.: Technická literatura BEN, 2002. 535 s. ISBN 80-7300-023-7.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Martin Friedl, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., *předseda oborové rady*

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá srovnáním dostupných aktivních univerzálních kmitočtových filtrů a následně návrhu univerzálního kmitočtového filtru 2. řádu. Univerzální filtr bude obsahovat filtry typu dolní propust (DP), horní propust (HP), pásmová propust (PP) a pásmová zádrž (PZ). Filtr bude možno ladit v rozmezí 100 Hz až 150 kHz.

KLÍČOVÁ SLOVA

aktivní, filtr, integrovaný, kmitočet, mikrokontrolér, převodník, univerzální

ABSTRACT

This bacehlor's thesis deals with the comparison of the available active universal frequency filter and then design of a 2nd order of the universal frequency filter. Universal filter will contain lowpass filters, highpass, bandpass and notch filter. The filter can be setup in the range of 100 Hz to 150 kHz.

KEYWORDS

active, filter, integrated, frequency, microcontroler, converter, universal

DOKOUPIL, J. *Laditelný kmitočtový filtr pro laboratorní účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 33 s., 13 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Friedl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Laditelný kmitočtový filtr pro laboratorní účely jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce panu Ing. Martinu Friedlovi, Ph.D., za podnětné návrhy k práci, odborné vedení, ochotu a trpělivost a také bych chtěl poděkovat svému spolužákovi Ondřeji Dvořákovi a týmu GFD ze společnosti Honeywell.

OBSAH

Úvod	1
1 ÚVOD DO TEORIE FILTRŮ	2
1.1 Kmitočtové filtry.....	2
1.2 Přenosové vlastnosti filtrů	2
1.3 Dělení kmitočtových filtrů.....	4
1.3.1 Dělení podle způsobu realizace	5
1.3.2 Dělení selektivních filtrů	7
2 ARC filtry 2. řádu	9
2.1 Univerzální filtry 2. řádu	9
2.1.1 Univerzální filtr podle Thomase–Towa.....	10
2.1.2 Univerzální filtr podle Kervina–Huelsmana–Newcomba.....	10
2.1.3 Univerzální filtr podle Akerberga–Mossberga	11
3 Možnosti elektronického ladění kmitočtových filtrů	12
3.1 Digitální potenciometry	12
3.1.1 Princip funkce digitálních potenciometrů.....	12
3.1.2 Digitální potenciometr DS1803	13
3.2 D/A převodníky	14
3.2.1 Princip funkce	14
3.2.2 D/A převodník AD7528.....	15
4 Srovnání dostupných integrovaných filtrů	16
4.1 Integrované filtry.....	16
4.1.1 Integrovaný obvod LTC1562-2	16
4.1.2 Integrovaný obvod UAF42	17
4.1.3 Integrovaný obvod LTC1060.....	17
4.1.4 Srovnání uvedených obvodů.....	18
5 Návrh filtru	19
5.1 Návrhové vztahy topologie Akerberg–Mossberg	19
5.2 Řízení filtru	21
5.3 Simulace zapojení	24

5.4	Návrh desky plošných spojů	25
6	Napájecí část filtru	26
7	Návrh softwarové části filtru	27
7.1	Důležité části řídicího programu.....	28
7.1.1	Volba typu impedančního přizpůsobení	28
7.1.2	Volba typu filtru.....	29
7.1.3	Výpočet mezního kmitočtu filtru	31
8	Závěr	33
	Literatura	34
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	35
A	Výpočty pro mezní kmitočty filtru	36
B	Schémata zapojení	42
C	Layout vrstev bottom, top, route2 a route15	46
D	Fotogalerie	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1.1: FILTR JAKO DVOJBRAN (UPRAVENO PODLE [1]).....	2
OBR. 1.2: MODULOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU HORNÍ PROPUST (PŘEVZATO Z [19])	4
OBR. 1.3: FÁZOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU HORNÍ PROPUST (PŘEVZATO Z [19]).....	4
OBR. 1.4: MODULOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU DOLNÍ PROPUST.....	7
OBR. 1.5: MODULOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU HORNÍ PROPUST	7
OBR. 1.6: MODULOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU PÁSMOVÁ PROPUST	8
OBR. 1.7: MODULOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU TYPU PÁSMOVÁ ZÁDRŽ ..	8
OBR. 2.1: SUMAČNÍ ZESILOVAČ (UPRAVENO PODLE [20])	9
OBR. 2.2: ZAPOJENÍ PODLE THOMASE–TOWA (UPRAVENO PODLE [1]).....	10
OBR. 2.3: ZAPOJENÍ PODLE KERVINA–HUELSMANA–NEWCOMBA (UPRAVENO DLE [1])..	10
OBR. 2.4: ZAPOJENÍ PODLE AKERBERGA–MOSSBERGA (UPRAVENO DLE [1])	11
OBR. 3.1: SCHÉMA DIGITÁLNÍHO POTENCIOMETRU (UPRAVENO DLE [3]).....	13
OBR. 3.2: BLOKOVÉ ZAPOJENÍ DS1803 (PŘEVZATO Z [18])	13
OBR. 3.3: STRUKTURA R-2R SÍTĚ (PŘEVZATO Z [17])	14
OBR. 3.4: BLOKOVÉ ZAPOJENÍ AD7528 (PŘEVZATO Z [17]).....	15
OBR. 4.1: BLOKOVÉ ZAPOJENÍ LTC1562-2 (PŘEVZATO Z [16]).....	16
OBR. 4.2: BLOKOVÉ ZAPOJENÍ UAF42 (PŘEVZATO Z [15])	17
OBR. 4.3: BLOKOVÉ ZAPOJENÍ LTC1060 (PŘEVZATO Z [14]).....	17
OBR. 5.1: VÝSLEDNÉ ZAPOJENÍ UNIVERZÁLNÍHO FILTRU	20
OBR. 5.2: BLOKOVÉ SCHÉMA FILTRU ŘÍZENÉHO MIKROKONTROLÉREM	21
OBR. 5.3: BLOKOVÉ SCHÉMA MIKROKONTROLÉRU ATMEGA64 (PŘEVZATO Z [16])	22
OBR. 5.4: PRINCIP ROTAČNÍHO ENKODÉRU (PŘEVZATO Z [11])	23
OBR. 5.5: SIMULOVANÉ ZAPOJENÍ.....	24
OBR. 5.6: MODULOVÉ CHARAKTERISTIKY FILTRŮ	25
OBR. 5.7: FÁZOVÉ CHARAKTERISTIKY FILTRŮ	25
OBR. 6.1: BLOKOVÉ SCHÉMA NAPÁJECÍ ČÁSTI	26
OBR. 7.1: VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMU	27
OBR. 7.2: VÝBĚR IMPEDANČNÍHO PŘIZPŮSOBENÍ.....	29
OBR. 7.3: VÝBĚR TYPU FILTRU	31
OBR. 7.4: VÝBĚR PZ NEBO PP	31
OBR. 7.5: VÝBĚR DP NEBO HP	31
OBR. 7.6: FINÁLNÍ ZOBRAZENÍ DISPLEJE	32

SEZNAM TABULEK

TAB. 4.1: SROVNÁNÍ PARAMETRŮ VYBRANÝCH INTEGROVANÝCH OBVODŮ.....	18
--	----

ÚVOD

Kmitočtové filtry dnes hrají v elektrotechnice velice důležitou roli. Objevují se takřka ve všech odvětvích elektrotechniky. V radioelektronice, měřicí technice, silnoproudé technice, elektroakustice atd. Kmitočtové filtry jsou lineární dvojbrany, které mají za úkol potlačovat nebo propouštět určité části kmitočtového spektra vstupního signálu. V dnešní době je zásadní požadavek na možnost digitálního ladění kmitočtových filtrů. Požadavky pro použití filtrů v praxi se zaměřují na ladění mezního kmitočtu, vhodného nastavení činitele jakosti a přenosu filtru.

Tato práce je rozdělena do sedmi hlavních kapitol. První kapitola se zaměřuje na popsání základních vlastností filtrů a jejich dělení. Druhá kapitola se zaměřuje na univerzální filtry 2. řádu. Třetí kapitola se zabývá možnostmi elektronického řízení filtrů. Čtvrtá kapitola obsahuje srovnání jednotlivých integrovaných obvodů. Pátá kapitola se zabývá návrhem univerzálního kmitočtového filtru. Šestá kapitola se zaměřuje na návrh napájecí části filtru. Sedmá kapitola potom obsahuje návrh softwarové části filtru.

1 ÚVOD DO TEORIE FILTRŮ

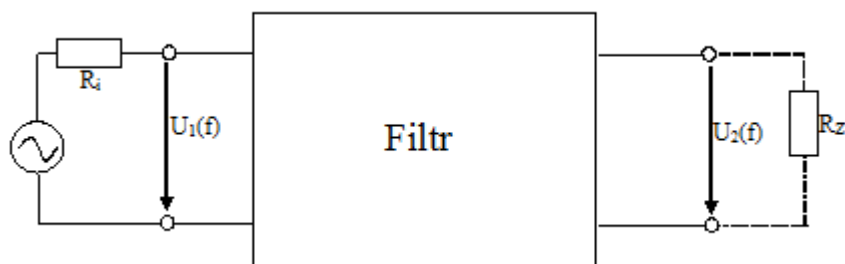
1.1 Kmitočtové filtry

Kmitočtové filtry jsou elektronická zařízení určená k úpravě kmitočtového spektra signálu, který jimi prochází. Filtry některé části spektra procházejících signálů propouští bez útlumu (propustné pásmo), jiné části spektra naopak potlačují (nepropustné pásmo). Tyto vlastnosti nejčastěji vyjadřujeme amplitudovou (modulovou) kmitočtovou charakteristikou (závislost modulu napěťového přenosu na kmitočtu).

Při průchodu signálu filtrem dochází obvykle k časovému zpoždění signálu, což je způsobeno fázovým posuvem procházejících harmonických kmitočtových složek signálu. Tyto vlivy vyjadřujeme pomocí fázové kmitočtové charakteristiky. Vliv na výstupní signál je zřejmý při vyjádření vlastností filtru a signálu v časové oblasti (např. impulsní odezva). Fázové vlivy filtru na signál v propustném pásmu se v časové oblasti projevují např. jako nežádoucí překmity či zvlnění průběhu signálu. Tento jev není vždy na škodu a využívá se ve fázovacích a zpozdňovacích obvodech. [1]

1.2 Přenosové vlastnosti filtrů

Přenosové charakteristiky kmitočtových filtrů popisují průchod signálu přes filtr. Prochází-li kmitočtovým filtrem harmonický signál s amplitudou o velikosti U_1 , kmitočtem f_1 a fází φ_1 , bude na výstupu kmitočtového filtru opět harmonický signál, který bude mít stejnou hodnotu kmitočtu, ale jinou velikost amplitudy (U_2) a fáze (φ_2). Základní zapojení filtru jako dvojbranu je uvedeno na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Filtr jako dvojbran (upraveno podle [1])

Napěťový přenos K_u harmonického signálu procházejícího filtrem lze pro daný kmitočet vyjádřit komplexním výrazem

$$K_u = K_u * e^{j\varphi} = \frac{U_2 e^{j\varphi_2}}{U_1 e^{j\varphi_1}}, \quad (1.1)$$

který se skládá z reálné a imaginární složky. Častěji se ale používá vyjádření přenosu pomocí modulu a argumentu

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad (1.2)$$

kde modul K_u je poměr amplitud výstupního K_u vstupnímu signálu a argument φ je výsledný fázový posuv mezi výstupním a vstupním signálem. Modul přenosu K_u je bezrozměrná veličina a často se vyjadřuje v logaritmické míře

$$K_u[\text{dB}] = 20 \cdot \log(K_u). \quad (1.3)$$

Toto běžně používané vyjádření umožňuje grafické znázornění velkého rozsahu hodnot. Modul a argument přenosu lze takto vypočítat jen pro konkrétní kmitočet harmonického signálu ω . Pro praktické použití je výhodné přenosové vlastnosti vyjádřit jako funkce kmitočtu, kdy pro každý kmitočet lze vypočítat odpovídající přenos. Závislost přenosu na kmitočtu je komplexní funkcí kmitočtu $K_u(j\omega)$, kde $\omega = 2\pi f$ nebo $K_u(p)$, kde $p = j\omega$. Přenosová funkce má nejčastěji tvar racionální lomené funkce

$$K(j\omega) = \frac{a_m(j\omega)^m + a_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + a_1j\omega + a_0}{b_n(j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + b_1j\omega + b_0}, \quad (1.4)$$

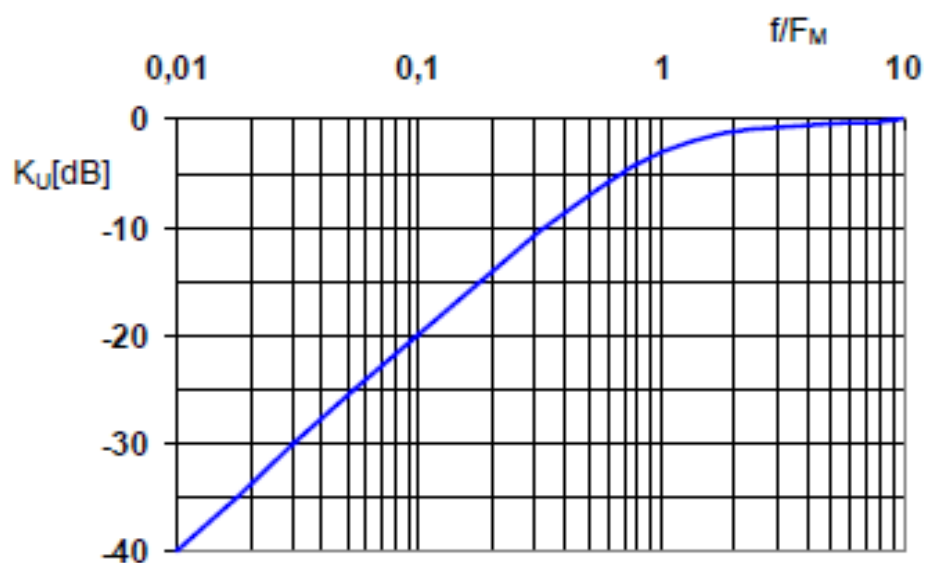
$$K(p) = \frac{a_m(jp)^m + a_{m-1}(p)^{m-1} + \dots + a_1p + a_0}{b_n(p)^n + b_{n-1}(p)^{n-1} + \dots + b_1p + b_0}, \quad (1.5)$$

kde řád polynomu čitatele m je menší nebo rovno řádu jmenovatele n . Tato komplexní funkce se opět skládá z modulové a argumentové složky, které se dají vynést v závislosti na kmitočtu jako modulová kmitočtová charakteristika $K(\omega)$ a argumentová kmitočtová charakteristika $\varphi(\omega)$, jinak také nazývané jako amplitudová a fázová kmitočtová charakteristika. Na obr. 1.2 je modulová kmitočtová charakteristika horní propusti. Na obr. 1.3 je argumentová kmitočtová charakteristika horní propusti. Velikost amplitud jednotlivých kmitočtových složek výsledného signálu se získá vynásobením amplitud vstupních složek příslušnou velikostí modulu přenosu pro daný kmitočet f_i podle vztahu

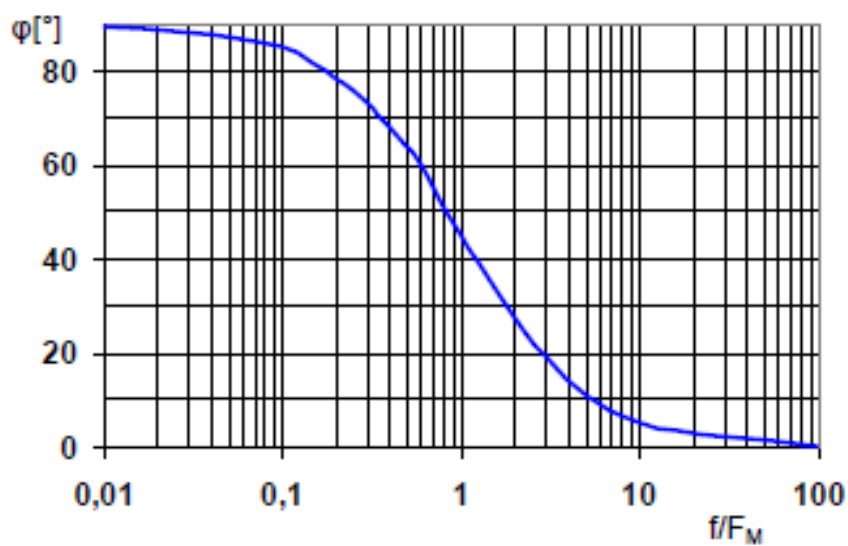
$$U_2(f_i) = U_1(f_i) \cdot K(f_i). \quad (1.6)$$

Velikost fází kmitočtových složek se získá přičtením příslušného fázového posuvu filtru $\varphi(f_i)$ k fázím vstupních složek

$$\varphi_2(f_i) = \varphi_1(f_i) + \varphi(f_i). \quad [1] \quad (1.7)$$



Obr. 1.2: Modulová kmitočtová charakteristika filtru horní propust (převzato z [19])



Obr. 1.3: Fázová kmitočtová charakteristika filtru horní propust (převzato z [19])

1.3 Dělení kmitočtových filtrů

Způsob realizace kmitočtového filtru ovlivňuje některé podstatné vlastnosti filtru. Podle způsobu realizace je možné je rozdělit do dvou hlavních skupin: na filtry analogové

a číslicové. Tyto se pak dělí podle kmitočtových charakteristik na selektivní filtry, korekční filtry a fázovací obvody, ovšem posledním dvěma jmenovaným zde nebude věnována pozornost.

1.3.1 Dělení podle způsobu realizace

Analogové filtry

Používají se již od počátku minulého století v různých variantách. Je možné je rozdělit na pasivní a aktivní filtry.

Pasivní filtry

Filtry RC

Tyto filtry jsou tvořeny rezistory a kapacitami. Využívají se v nenáročných aplikacích jako oddělovací a vazební obvody v zesilovačích a v RC oscilátorech.

Filtry RLC

Využívají rezonančních vlastností LC obvodů. Na nízkých kmitočtech je jejich použití omezené malým činitelem jakosti, velkými rozměry a vysokou cenou cívek. Jejich praktické použití je omezeno na oblast kmitočtů od 10 kHz do 100 MHz. Dá se s nimi realizovat téměř libovolný obvod. [2]

Mikrovlnné filtry RLC

Speciální filtry RLC, které pracují v oblasti vysokých kmitočtů a mikrovln. Využívají kapacit mezi vodiči vedení a indukčnosti vedení. Cívky jsou nahrazovány jednoduchými smyčkami nebo pásky plochých vodičů, kapacitami zase sousedními ploškami vodičů.

Elektromechanické filtry

Vyznačují se vysokou selektivitou. Jejich základem je kovový mechanický rezonátor. Do této kategorie patří i piezoelektrické filtry využívající vlastnosti piezoelektrických krystalů a piezokeramiky. Lze s nimi dosahovat vysoké hodnoty činitele jakosti a používat je v oblasti od 10 kHz do 200 MHz. [2]

Při vhodném zapojení aktivních prvků a selektivních obvodů se eliminuje potřeba cívek v obvodu. I přes rozvoj integrované techniky se nedají použít na obvody zpracovávající vysoké kmitočty.

Aktivní filtry

Filtry ARC (aktivní filtry RC)

Cívky jsou v těchto obvodech nahrazeny vhodným zapojením rezistorů, kapacitorů a aktivních prvků, především operačních zesilovačů.

Diskrétně pracující filtry ARC – filtry ASC

Snaha po snadné integraci vedla k vývoji filtrů, jejichž nedílnou součástí jsou analogové spínače ovládané řídicím hodinovým signálem. Dochází zde k uplatnění tzv. vzorkovacího principu, při kterém je převáděn analogový signál na časovou posloupnost vzorků, které odpovídají hodnotám spojitého signálu v okamžicích zapamatování vzorku. [2]

Číslicové filtry

Číslicový filtr je ve většině případů program, který mění požadovaným způsobem spektrum vstupního signálu. Jinými slovy pomocí matematických operací uvnitř procesoru vykonává funkci klasických analogových filtrů. Těchto matematických operací je mnoho a musí být provedeny v určitém časovém intervalu. Tím způsobují zpoždění výstupního signálu. Toto zpoždění je závislé na rychlosti, s jakou je daný mikroprocesor schopen pracovat, na řádu filtru a na použitém algoritmu výpočtu. Proto je použití číslicových filtrů v současné době omezeno na cca jednotky MHz a dá se dosáhnout činitele jakosti Q až 100 000. [2]

Filtry s nekonečnou impulsní odezvou (IIR)

Základní princip představuje zpožďovací linku, ze které je výstup podle zadaného algoritmu veden zpět na vstup. Tyto filtry mohou mít podobné charakteristiky jako analogové filtry a je u nich možno využívat aproximace, které jsou ekvivalentní k aproximacím u analogových filtrů (Čebyšev, Butterworth atd.). Filtry IIR, obdobně jako analogové filtry, vykazují nelineární fázové charakteristiky. Díky zpětné vazbě ovšem tyto filtry mohou být méně stabilní a způsobovat záškuby, případně oscilace.

Filtry s konečnou impulsní odezvou (FIR)

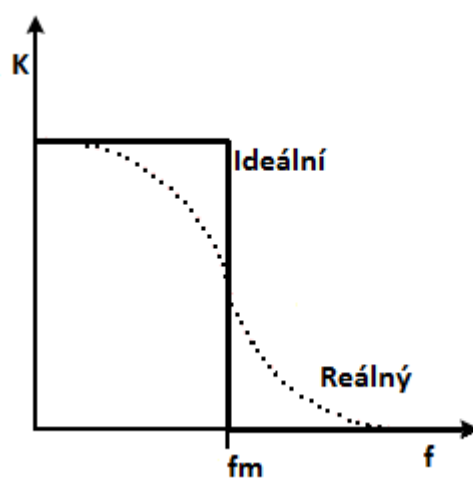
Tento typ číslicových filtrů nemá ekvivalent v analogové oblasti. Jelikož neobsahují zpětnou vazbu, jsou vždy stabilní. Lze s nimi realizovat strmý přechod z propustného do nepropustného pásma, které nemohou být v analogové oblasti prakticky realizovány. Mají vždy lineární fázovou charakteristiku, ovšem při zvyšování řádu filtru roste jeho zpoždění.

1.3.2 Dělení selektivních filtrů

Tyto filtry se dají rozdělit podle toho, jaké pásmo kmitočtů propouštějí a jaké potlačují na dolní propust (DP), horní propust (HP), pásmovou propust (PP) a pásmovou zadrž (PZ). V ideálním případě je modul přenosu filtru v propustném pásmu konstantní a v nepropustném nulový.

Dolní propust (DP)

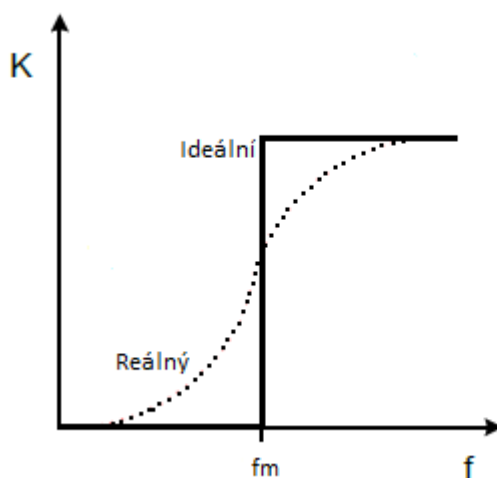
Tento typ filtrů propouští složky signálu s kmitočty, jež jsou nižší než mezní kmitočet f_m (obr. 1.4).



Obr. 1.4: Modulová kmitočtová charakteristika filtru dolní propust

Horní propust (HP)

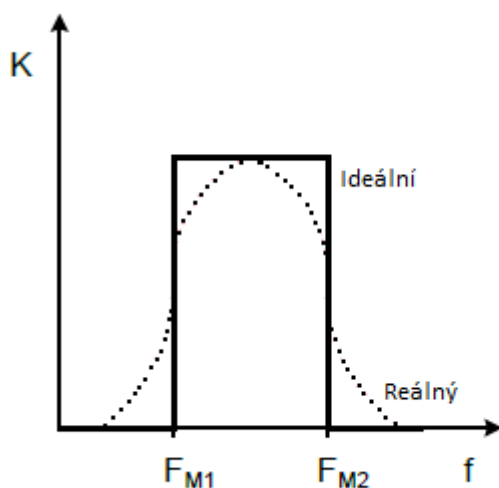
Propouští složky signálu s kmitočty, jež jsou vyšší než mezní kmitočet f_m (obr. 1.5).



Obr. 1.5: Modulová kmitočtová charakteristika filtru horní propust

Pásmová propust (PP)

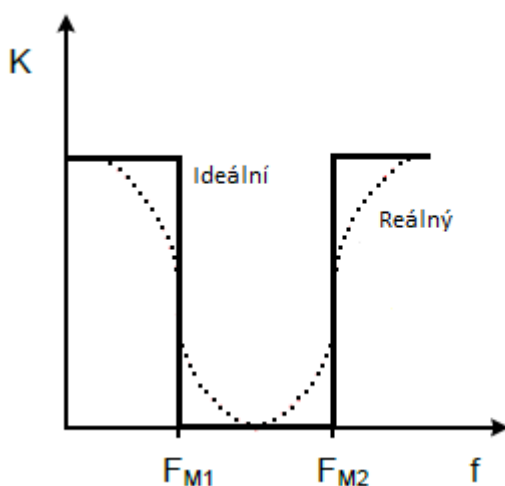
Propouští složky signálu s kmitočty, které se nacházejí mezi dolním mezním kmitočtem F_{M1} a horním mezním kmitočtem F_{M2} (obr. 1.6). Tyto filtry jsou vždy nejméně druhého řádu.



Obr. 1.6: Modulová kmitočtová charakteristika filtru pásmová propust

Pásmová zadrž (PZ)

Zadržuje složky signálu s kmitočty, které se nacházejí mezi dolním mezním kmitočtem F_{M1} a horním mezním kmitočtem F_{M2} (obr. 1.7). Tyto filtry jsou vždy nejméně druhého řádu.



Obr. 1.7: Modulová kmitočtová charakteristika filtru typu pásmová zadrž

2 ARC FILTRY 2. ŘÁDU

Jak bylo uvedeno výše, v aktivních filtrech RC je cívka nahrazena aktivním prvkem. Děje se tak proto, že cívka má na nízkých kmitočtech velké rozměry, relativně velkou cenu a při použití feromagnetického materiálu se vždy jedná o nelineární prvek. Jako aktivní prvky se používají operační zesilovače (OZ), transkonduktanční zesilovače (OTA), transimpedanční zesilovače (TIA), gyrátory, konvejory.

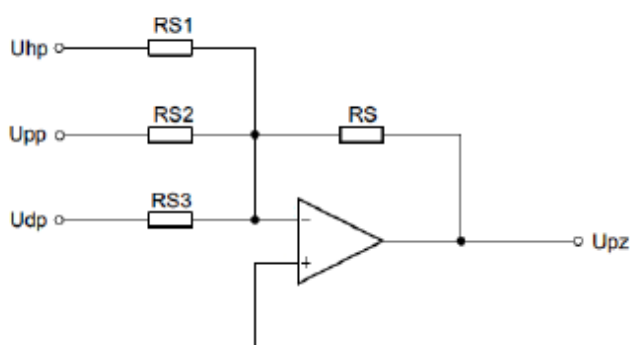
Cívka se dá nahradit dvěma základními způsoby. První spočívá v použití obvodu, který přímo nahrazuje cívku jako dvojpól a vykazuje mezi určitými svorkami příslušnou indukčnost. Druhý princip nahrazuje cívku nepřímou, pomocí transformace výchozího RLC obvodu do ekvivalentně se chovající struktury RCD, která indukční prvek neobsahuje, ale na druhou stranu potřebuje syntetický prvek D – dvojný kapacitor (kmitočtově závislý negativní rezistor). [1]

2.1 Univerzální filtry 2. řádu

V této kapitole budou rozebrána základní zapojení univerzálních aktivních RC filtrů druhého řádu s operačními zesilovači, které nám dovolují realizaci všech základních typů filtrů. Jejich výhodou je snadné nastavení rezonančního kmitočtu, činitele jakosti, základního přenosu a poměrně snadné elektronické řízení. Používají se tři základní obvodová zapojení:

- Univerzální filtr podle Thomase–Towa
- Univerzální filtr podle Kervina–Huelsmana–Newcomba
- Univerzální filtr podle Akerberga–Mossberga

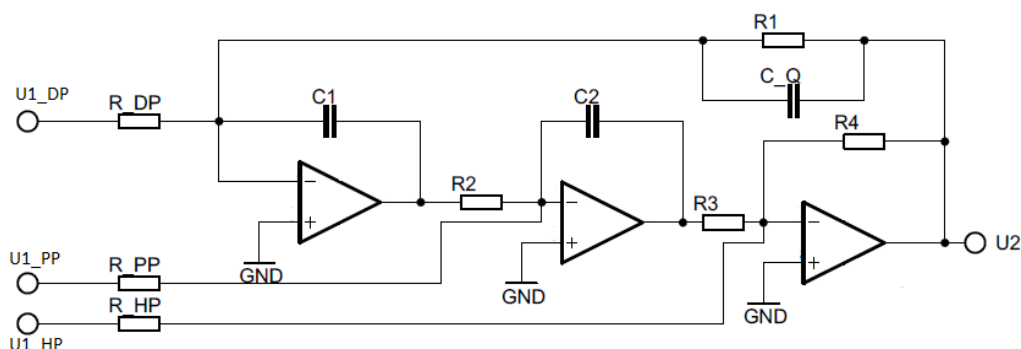
Uvedené topologie umožňují realizaci dolní propusti, horní propusti a pásmové propusti. Přidáním čtvrtého, sumačního zesilovače však můžeme realizovat i filtr typu pásmová zadrž (obr. 2.1).



Obr. 2.1: Sumační zesilovač (upraveno podle [20])

2.1.1 Univerzální filtr podle Thomase–Towa

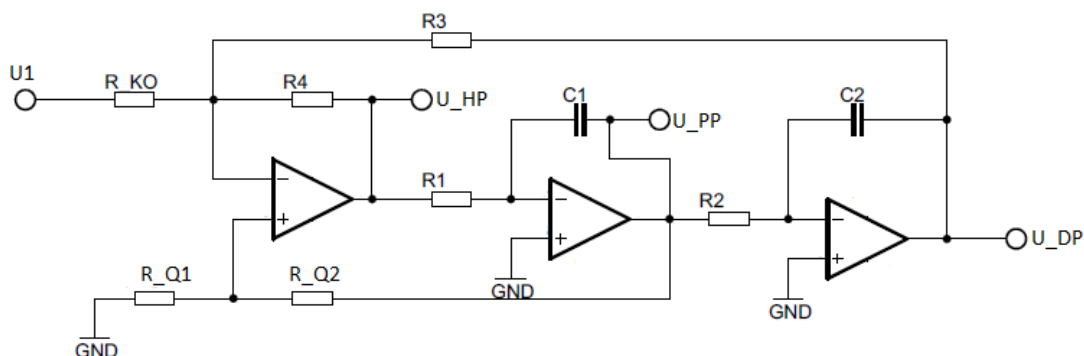
Toto zapojení využívá připojení tlumicího rezistoru paralelně k jednomu z kapacitorů C1 a C2 či tlumicího kapacitoru CQ paralelně k jednomu z rezistorů R1 až R3. Též je možné použít méně obvyklé zapojení RQ a C. Uvedená varianta ale neumožňuje jednoduché ladění dvěma typy prvků (pro tlumicí kapacitor CQ nelze ladit změnou C1, C2, pro tlumicí kapacitor RQ nelze ladit změnou R1, R2). [1] Na obrázku 2.2 je zapojení univerzálního filtru podle Thomase–Towa.



Obr. 2.2: Zapojení podle Thomase–Towa (upraveno podle [1])

2.1.2 Univerzální filtr podle Kervina–Huelsmana–Newcomba

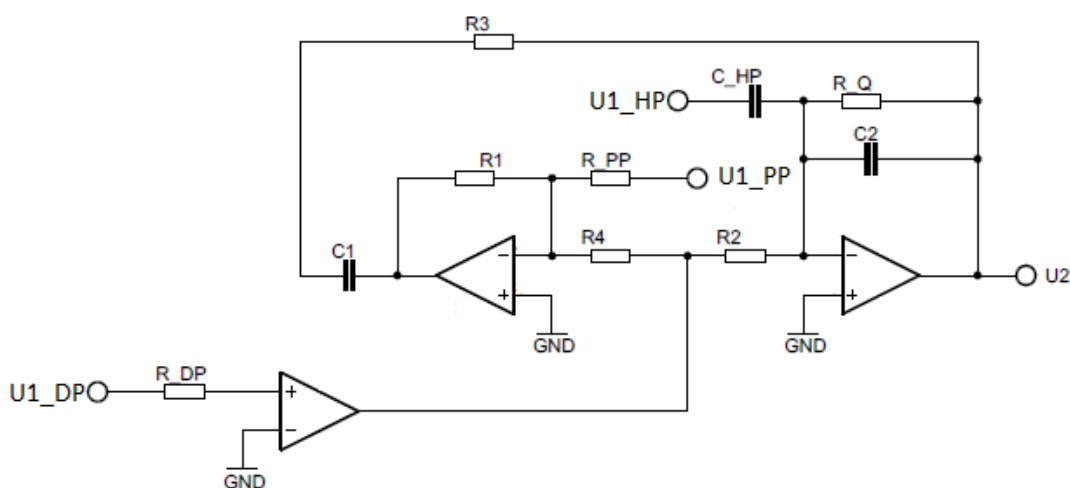
Toto zapojení využívá odporovou zpětnou vazbu do diferenciálně zapojeného invertoru. Tento obvod umožňuje ladění souběžnou změnou dvou rezistorů i dvou kapacitorů. Širokopásmové ladění je výhodné realizovat plynule souběžnou změnou R1 a R2, např. v rámci dekády, a skokově přepnout jednotlivé dekády pomocí C1 a C2. Určitou nevýhodou je zde nelineární závislost hodnoty Q a přenosu K_0 . [1] Na obrázku 2.3 je zapojení tohoto filtru.



Obr. 2.3: Zapojení podle Kervina–Huelsmana–Newcomba (upraveno dle [1])

2.1.3 Univerzální filtr podle Akerberga–Mossberga

Toto zapojení je velmi podobné jako předchozí zapojení, ovšem rozdíl oproti předchozím zapojení je v přidání dalšího OZ jako invertoru pro použití tlumicího prvku zpětné vazby. Výhodou tohoto zapojení je zvýšení použitelného kmitočtového pásma, kdy integrátor eliminuje silný vliv tranzitního kmitočtu OZ. Další výhodou je snadnější nastavení hodnoty činitele jakosti a základního přenosu. Nevýhodou ovšem mohou být parazitní oscilace s malou amplitudou na kmitočtu $F_T/2$, které jsou důsledkem zapojení neinvertujícího integrátoru s invertorem v kladné zpětné vazbě. Tyto oscilace nemusí omezovat funkci filtru, mohou však působit negativně a rušivě. [1]



Obr. 2.4: Zapojení podle Akerberga–Mossberga (upraveno dle [1])

3 MOŽNOSTI ELEKTRONICKÉHO LADĚNÍ KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

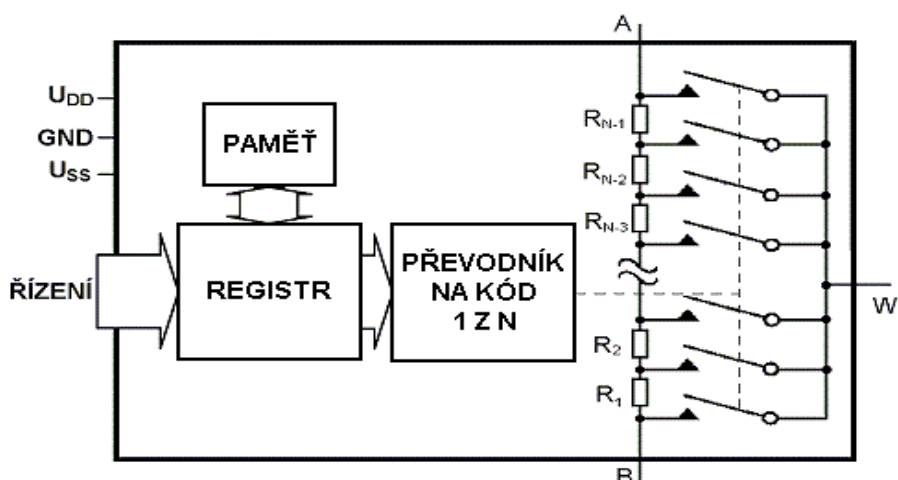
Možností elektronického přeladování mezních kmitočtů je mnoho. Kmitočtové filtry je možno ladit pomocí D/A převodníků, digitálních potenciometrů, analogovými násobičkami, proudově řízenými zesilovači atd. V této kapitole bude věnována pozornost dvěma digitálním variantám ladění – ladění pomocí D/A převodníku a ladění pomocí digitálních potenciometrů.

3.1 Digitální potenciometry

V současné době jsou digitální potenciometry hojně využívány pro elektronické ladění obvodů, jako jsou kmitočtové filtry, zesilovače, generátory atd. Snahou výrobců je přiblížit se vlastnostem klasických mechanických potenciometrů a zároveň odstranit jejich nevýhody.

3.1.1 Princip funkce digitálních potenciometrů

Jestliže N je celkový počet poloh jezdce, pak mezi vývody A a B je zapojeno $N-1$ rezistorů řazených do série, které tvoří odporovou dráhu. Jezdec je představován vývodem W (obr. 3.1). Ten je pomocí elektronických spínačů připojován do rezistorové sítě podle toho, jaké je na vstupu potenciometru bitové slovo. Lze je ovládat pomocí mikrokontroléru, ke kterému mohou být připojeny pomocí sériové sběrnice I2C a méně často pomocí paralelní sběrnice. Počet poloh jezdce (rozlišovací schopnost) bývá většinou mocnina dvou (32, 64, 128, 256,...) a odpor dráhy se pohybuje od 1 k Ω do 1 M Ω . Přesnost odporu dráhy se pohybuje v rozmezí 20–30 % a výrobci zaručují velkou linearitu převodu čísla na odpor. Nelinearita převodu obvykle bývá menší než nejnižší platný bit. Výhodou digitálních potenciometrů je absence mechanických částí, která zvyšuje spolehlivost a zamezuje vzniku špatného kontaktu mezi jezdce a odporovou dráhou. Rovněž změna polohy jezdce nemá za následek rušivé vlivy. Další výhodou jsou jejich malé rozměry, jelikož jsou pouzřeny jako integrované obvody. Nevýhodou ovšem je nezanedbatelný odpor jezdce, který se pohybuje v desítkách až stovkách ohmů. Dále pak omezené propustné kmitočtové pásmo, a to díky parazitním kapacitám rezistorové sítě a elektronických spínačů (tyto kapacity mohou dosahovat hodnot až 60 pF) a nemožnost pracovat na kmitočtech přesahujících 1 MHz. [3]



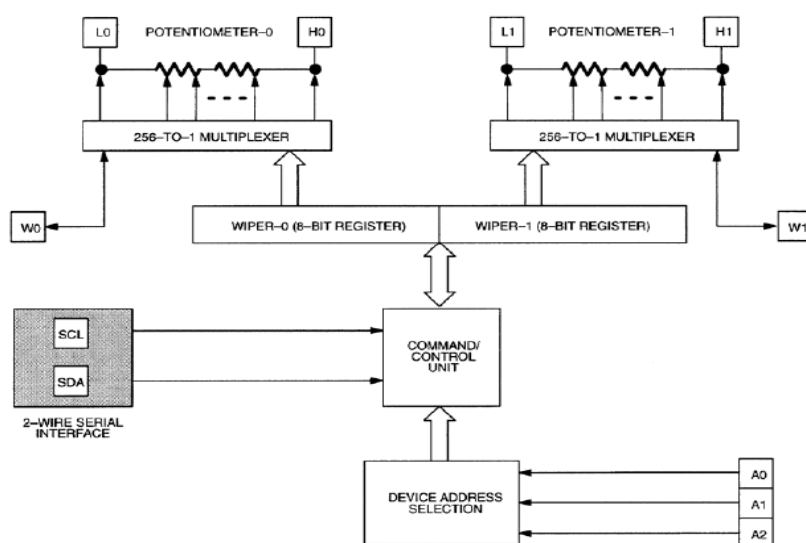
Obr. 3.1: Schéma digitálního potenciometru (upraveno dle [3])

3.1.2 Digitální potenciometr DS1803

Integrovaný obvod DS1803 je 2kanálový digitální adresovatelný potenciometr od firmy MAXIM-DALLAS [4]. Jeho parametry jsou následující:

- Počet poloh jezdce: 256
- Odporový rozsah: 10 k Ω , 50 k Ω , 100 k Ω
- Sběrnice: I²C
- Napájecí napětí: 3 V nebo 5 V
- Rozsah pracovních teplot: -40 °C až 85 °C
- Adresovatelné vstupy: 3
- Dostupná pouzdra: TSSOP, SO, DIP

Na obrázku 3.2 pak můžeme vidět blokové zapojení tohoto digitálního potenciometru.



Obr. 3.2: Blokové zapojení DS1803 (převzato z [18])

3.2 D/A převodníky

Digitálně-analogový převodník převádí vstupní číslicové hodnoty na odpovídající výstupní analogové hodnoty. Analogový signál je v závislosti na zakódovaném digitálním údaji odvozen od referenčního napětí. Z toho plyne, že limitujícím faktorem pro rozlišitelnost D/A převodníků je přesnost referenčního napětí.

D/A převodníky se dělí na dvě základní skupiny – proudové a napěťové, přičemž pro ladění filtrů je možné použít pouze proudové převodníky s odporovou sítí R-2R. Napěťové převodníky se pro tento účel nedají použít, jelikož mají na výstupu oddělovací zesilovač, který je nežádoucí.

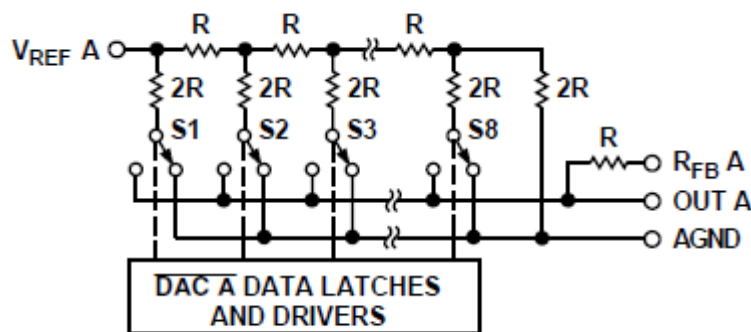
3.2.1 Princip funkce

Základním principem jednobitového převodníku je přepínač, který přepíná v závislosti na příchozím digitálním kódu do polohy 1 nebo 0. Proudový princip převodu je založen na vyhodnocení proudu protékajícího paralelně řazenými rezistory. [2]

Při používání D/A převodníků jako laditelného prvku je potřeba tento obvod zapojit mezi pin referenčního napětí převodníku a pin s výstupním proudem převodníku. Ekvivalentní odpor N bitového převodníku v tomto zapojení je

$$R_{DAC} = \frac{N * R}{D}, \quad (3.1)$$

kde N značí počet úrovní, R je vnitřní příčkový odpor R-2R sítě a D je bitové slovo řídící převodník. Na obrázku 3.3 můžeme vidět strukturu sítě R-2R.



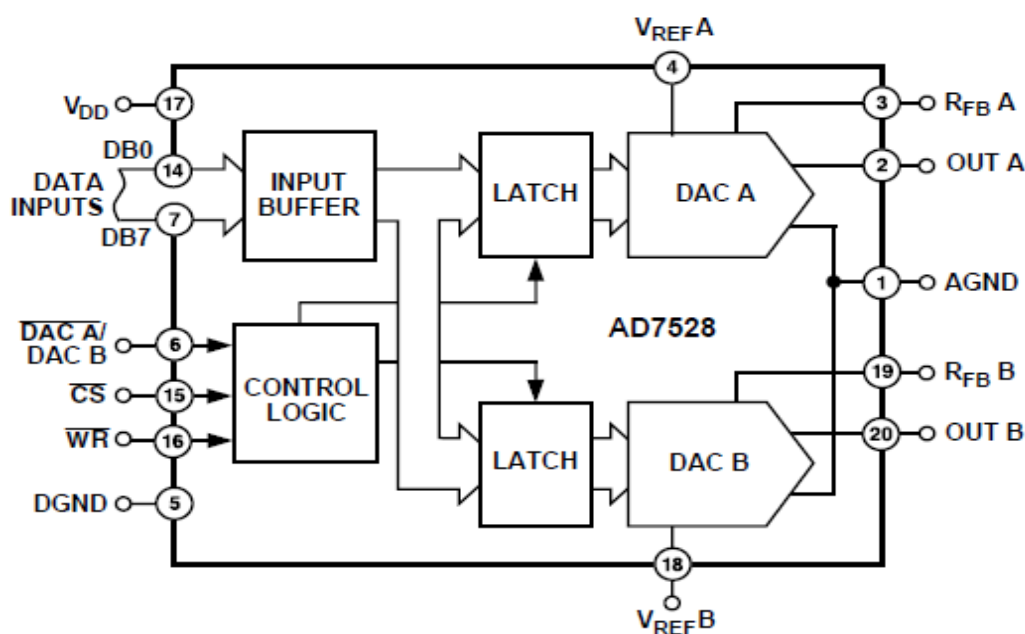
Obr. 3.3: Struktura R-2R sítě (převzato z [17])

3.2.2 D/A převodník AD7528

AD7528 je osmibitový dvoukanálový proudový CMOS D/A převodník od firmy ANALOG DEVICES [5]. Převodník je vybaven vnitřní R-2R přepínatelnou odporovou sítí a je možné jej ovládat pomocí paralelní sběrnice. Jeho parametry jsou následující:

- Počet úrovní: 256
- Napájení: 5–15 V
- Rozsah pracovních teplot: v závislosti na typu -55 °C až +125 °C
- Dostupná pouzdra: PLCC, DIP, SOIC

Tímto obvodem se dají ladit parametry kmitočtových filtrů, zisk/útlum obvodů, stereo audio obvody a X-Y grafika. Na obrázku 3.4 lze vidět jeho blokové zapojení.



Obr. 3.4: Blokové zapojení AD7528 (převzato z [17])

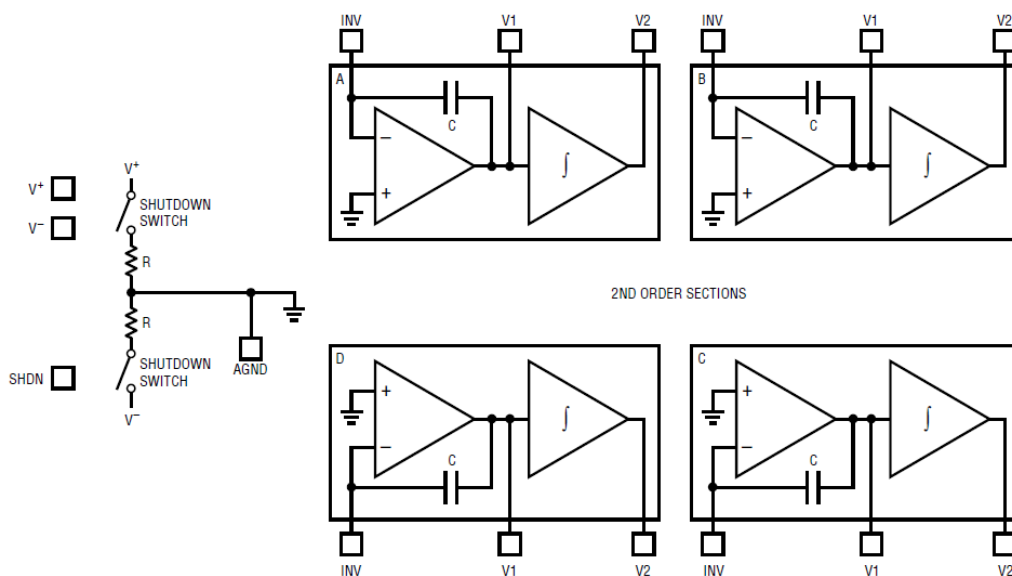
4 SROVNÁNÍ DOSTUPNÝCH INTEGROVANÝCH FILTRŮ

4.1 Integrované filtry

V dnešní době je na trhu mnoho integrovaných filtrů od mnoha výrobců. Většina z nich má bohužel specifické parametry, které nelze modifikovat, a tak je jejich použití v univerzálních aplikacích omezeno. Nastavení parametrů je umožněno pouze připojením externích komponent, nejčastěji rezistorů a kondenzátorů. Další nevýhodou těchto integrovaných obvodů je to, že ve většině případů nelze realizovat skutečně univerzální filtr, ale pouze filtr např. dolní propust a horní propust. Na trhu je velice málo obvodů, které dovolují realizovat všechny základní typy filtrů (DP, HP, PP, PZ). Pokud je třeba sestavit opravdu univerzální kmitočtový filtr s velkým kmitočtovým rozsahem, nezbyvá jiná možnost, než ho realizovat pomocí diskretních součástek.

4.1.1 Integrovaný obvod LTC1562-2

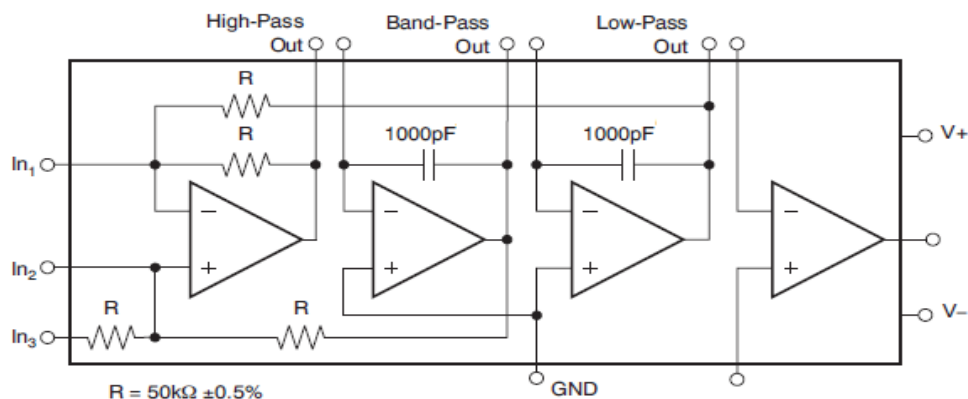
LTC1562-2 je aktivní filtr od společnosti Linear Technology [6] s nízkým zkreslením. Je to filtr druhého řádu, který lze kaskádně spojit a tím dosáhnout až filtru osmého řádu. Lze s ním realizovat pouze filtry typu dolní propust, horní propust a pásmová propust. Rozsah mezních kmitočtů je od 20 kHz do 300 kHz. Tento kmitočet, stejně jako činitel jakosti, lze měnit pomocí dvou externích rezistorů (v případě DP, PP), nebo pomocí jednoho rezistoru a jednoho kondenzátoru (v případě HP). Na obrázku 4.1 je možno vidět blokové zapojení tohoto obvodu.



Obr. 4.1: Blokové zapojení LTC1562-2 (převzato z [16])

4.1.2 Integrovaný obvod UAF42

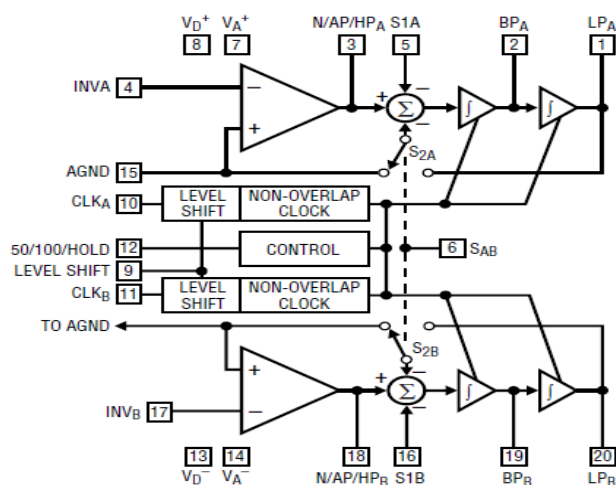
UAF42 je aktivní filtr druhého řádu od společnosti Texas Instruments [7]. Lze s ním realizovat všechny druhy filtrů (HP, DP, PP, PZ) a jeho mezní kmitočet lze pomocí externích rezistorů ladit na kmitočty od 0 Hz do 100 kHz. Tento integrovaný obvod už má ve své vnitřní struktuře zabudované dva 1000pF kondenzátory s tolerancí $\pm 0,5\%$. Doporučené použití je v komunikačních zařízeních a lékařských přístrojích. Na obrázku 4.2 je možno vidět blokové zapojení tohoto integrovaného obvodu.



Obr. 4.2: Blokové zapojení UAF42 (převzato z [15])

4.1.3 Integrovaný obvod LTC1060

LTC1060 je číslicový aktivní filtr od firmy Linear Technology [6], který se skládá ze dvou vysokovýkonových spínacích filtrů. Každý filtr společně s dvěma až pěti rezistory může realizovat všechny základní typy filtrů (DP, HP, PP, PZ). Při nesymetrickém napájení 5 V lze obvod ladit až do mezního kmitočtu 10 kHz, při symetrickém napájení ± 5 V lze mezní kmitočet ladit až do mezního kmitočtu 30 kHz. Doporučené aplikace jsou sledovací filtry a telekomunikační filtry. Na obrázku 4.3 je blokové schéma tohoto obvodu.



Obr. 4.3: Blokové zapojení LTC1060 (převzato z [14])

4.1.4 Srovnání uvedených obvodů

Tab. 4.1 obsahuje srovnání vybraných parametrů výše popsaných filtrů. Je zřejmé, že se integrované obvody od sebe značně liší, hlavně co se týče kmitočtového rozsahu.

Tab. 4.1: Srovnání parametrů vybraných integrovaných obvodů

Parametr	LTC1562-2	UAF42	LTC1060
Řád filtru	2, 4, 8	2	2
Realizace filtru	DP, HP, PP	DP, HP, PP, PZ	DP, HP, PP, PZ
Kmitočtový rozsah	20–300 kHz	0–100 kHz	0–10 kHz, 0–30 kHz
Maximální činitel jakosti	-	400	-
Napájení	± 5 V	± 15 V	5 V, ± 5 V
Šum	7,3 μ V	25 nV	240 μ V
Rozsah pracovních teplot	-40 °C až 85 °C	-40 °C až 85 °C	-40 °C až 85 °C
Dostupná pouzdra	SSOP-20	PDIP-14,SOIC-16	PDIP-20

5 NÁVRH FILTRU

S ohledem na splnění požadavků práce nelze použít žádný z výše uvedených integrovaných obvodů a je nutné filtr sestavit z diskretních součástek. Byly vybrány operační zesilovače OPA355 od firmy Texas Instruments [7] v zapojení Akerberg–Mossberg. Jedná se o rychlé operační zesilovače s tranzitním kmitočtem 200 MHz, takže se neprojeví reálné vlastnosti OZ a je možné plně využít výhod topologie Akerberg–Mossberg.

5.1 Návrhové vztahy topologie Akerberg–Mossberg

Přenosová funkce tohoto filtru je dána vztahem

$$K = K_0 \frac{p \frac{\Omega_0}{Q}}{p^2 + p \frac{\Omega_0}{Q} + \Omega_0^2}, \quad (5.1)$$

Z ní vyplývá vztah pro výpočet rezonančního kmitočtu

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} * \sqrt{\frac{R_4}{R_3}}, \quad (5.2)$$

A vztah pro výpočet činitele jakosti

$$Q = \frac{R_Q}{\sqrt{R_3 R_4}} * \sqrt{\frac{C_1 R_1}{C_2 R_2}}, \quad (5.3)$$

Ladění kmitočtů bude probíhat na dvou rozsazích, pomocí přepínání ladicích kondenzátorů C_1 a C_2 . Tyto kondenzátory mají na obou rozsazích stejné hodnoty. Ladění kmitočtů v mezích jednoho rozsahu budou zajišťovat laditelné rezistory R_1 a R_2 , které budou mít opět stejné hodnoty a budou realizovány pomocí rezistorové sítě D/A převodníku. Teoretické výpočty pro mezní kmitočet filtru jsou uvedeny v příloze A. V příloze B je pak možno vidět schéma zapojení zařízení.

Hodnota R_{K0} pro přenos $K=1$ je určena ze vztahu

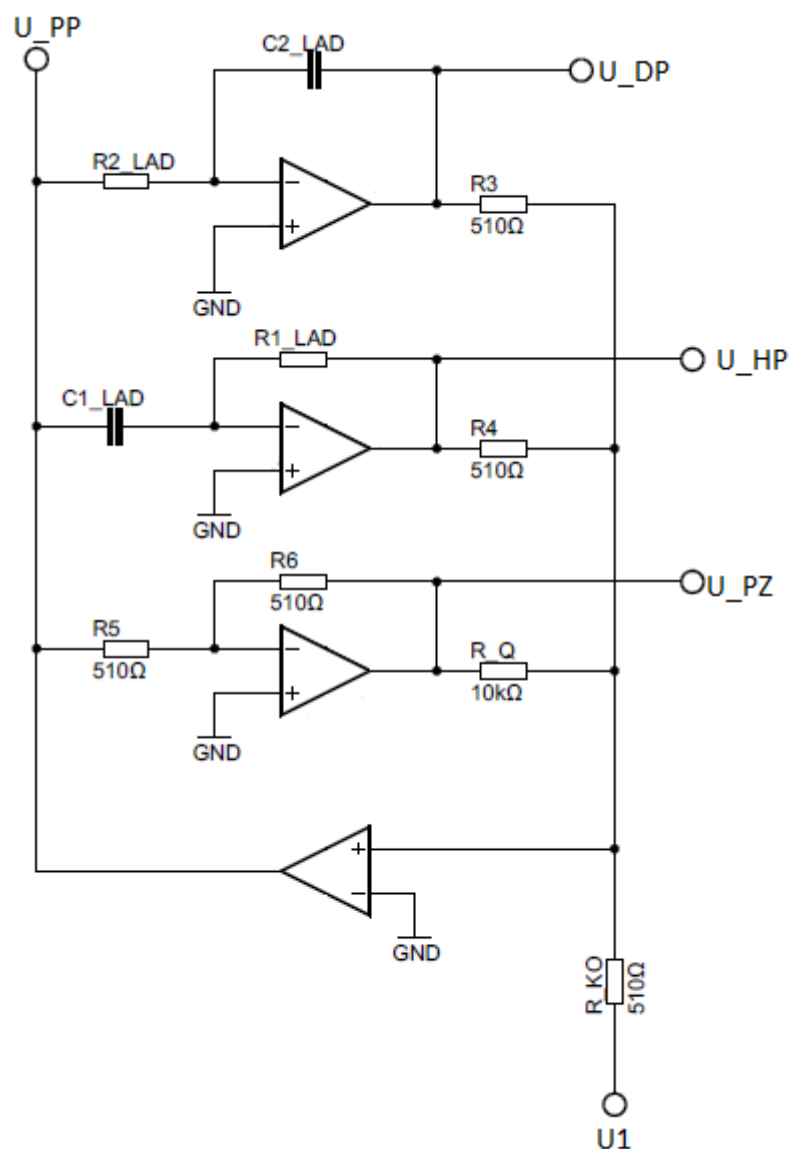
$$R_{K0} = K * R = 510\Omega \quad (5.4)$$

Pro zjednodušení byly rezistory R_3 až R_6 zvoleny takto:

$$R_3=R_4=R_5=R_6=R_{KO}=R=510\ \Omega$$

Ze vztahu 4.3 vyplývá hodnota rezistoru R_Q

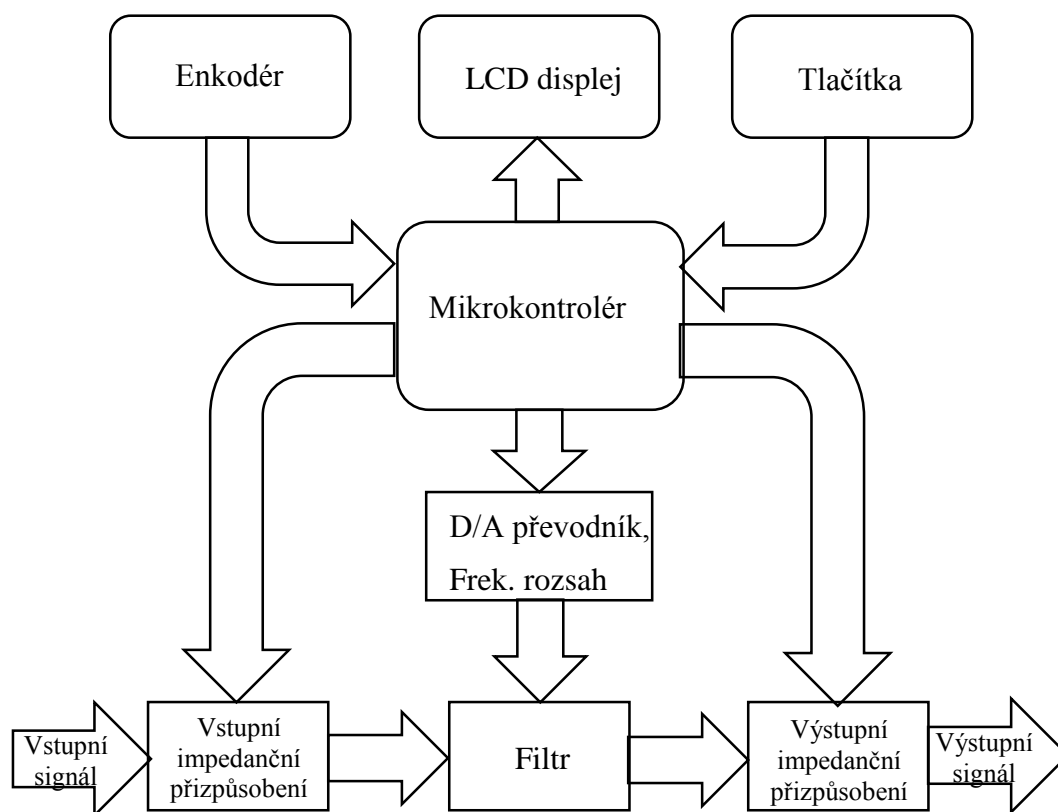
$$R = Q\sqrt{R_3R_4} = 10\text{k}\Omega, \quad (5.5)$$



Obr. 5.1: Výsledné zapojení univerzálního filtru

5.2 Řízení filtru

Řízení navrženého univerzálního filtru bude obstarávat mikrokontrolér jako centrální řídicí jednotka, která bude obsluhovat připojené periferní obvody. Mezní kmitočet bude nastavován pomocí rotačního enkodéru a samotný filtr bude přeladován pomocí D/A převodníku. Pomocí relé bude možné přepínat vstupní a výstupní impedanci, typ filtru a rozsah filtru. Na LCD displeji potom bude zobrazena informace o velikosti hodnoty mezního kmitočtu, typu filtru (DP, HP, PP, PZ) a hodnotě impedančního přizpůsobení filtru. Na obrázku 5.2 je blokové schéma tohoto mikrokontrolérem řízeného filtru.



Obr. 5.2: Blokové schéma filtru řízeného mikrokontrolérem

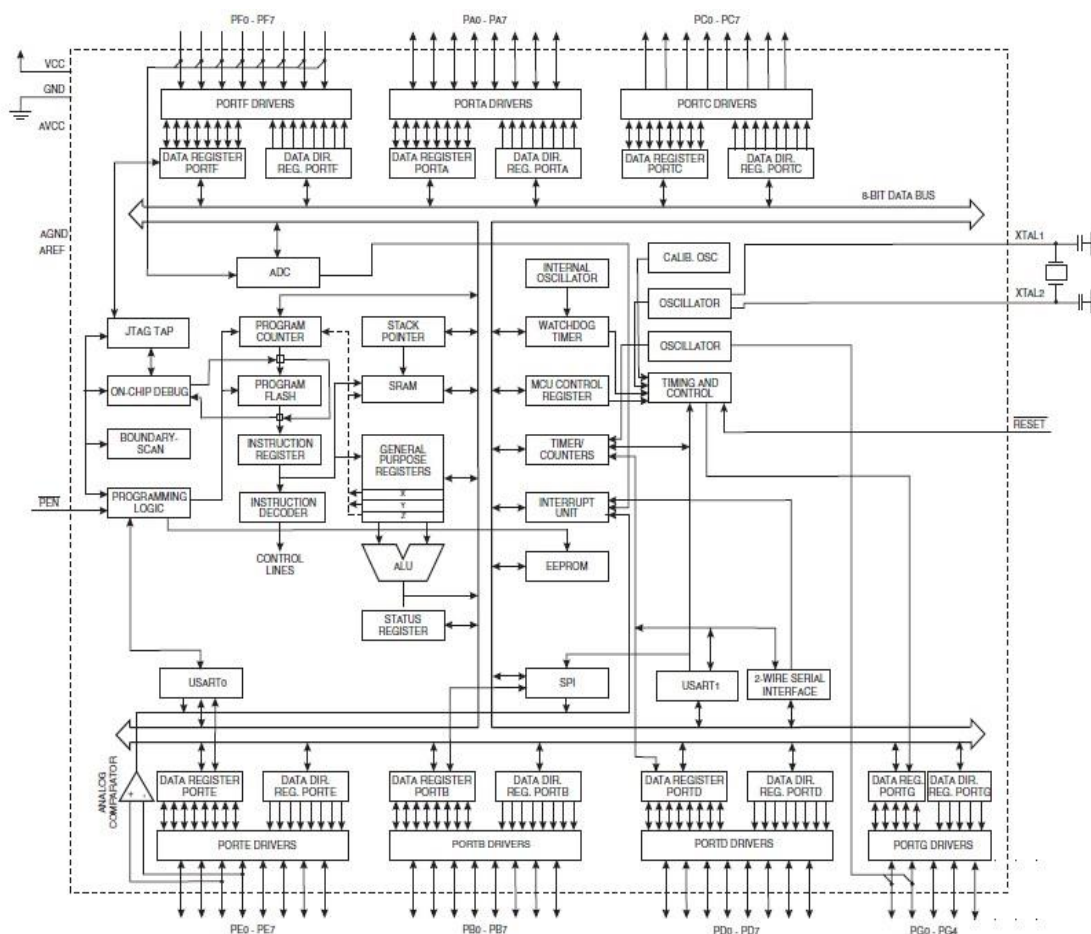
Mikrokontrolér ATmega164

ATmega64 je 8bitový mikrokontrolér od firmy Atmel [10], postavený na Harvardské architektuře (oddělená paměť programu a dat). Tyto paměti jsou typu FLASH (paměť

programu), EEPROM a SRAM (paměti dat). Velikost paměti FLASH je 64 kB, paměti EEPROM 2 kB a paměti SRAM 4 kB.

Centrální řídicí jednotka (CPU) tohoto mikrokontroléru obsahuje aritmeticko-logickou jednotku (ALU), která provádí logické a početní operace s daty. Výsledky těchto operací se ukládají do paměti registru. ATmega64 obsahuje těchto registrů 32, jsou 8bitové a pro uživatele je přístupná pouze horní polovina těchto registrů.

Frekvence tohoto mikrokontroléru je 16 MHz a jeho instrukční sada čítá 130 instrukcí. Další periférie a bloky tohoto mikrokontroléru jsou 6 vstupně/výstupní 8pinové porty, čítač/časovač, obvod watchdog, 10bitový A/D převodník atd. Na obrázku 5.3 je možno vidět blokové schéma tohoto mikrokontroléru.



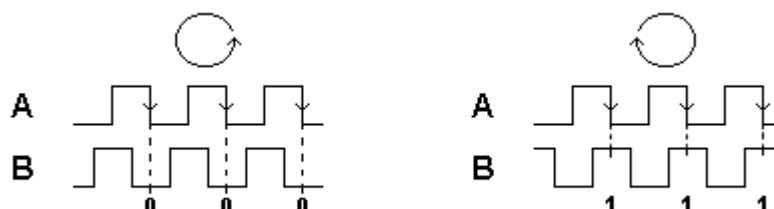
Obr. 5.3: Blokové schéma mikrokontroléru ATmega64 (převzato z [16])

D/A převodník

Podrobnější popis použitého D/A převodníku je uveden v kapitole 3.2.2. Tento převodník je schopen nastavit ve 256 krocích odpory v rozmezí 10 k Ω až 2,56 M Ω . Hodnota jeho příčkového odporu je 10 k Ω a z toho důvodu není možné dosáhnout kmitočtů vyšších než cca 15,8 kHz. Z tohoto důvodu je použito pro nastavování hodnot kmitočtů dvou rozsahů.

Rotační enkodér

Rotační enkodéry (někdy označované jako inkrementální čidla) jsou součástky, které díky mechanickému otáčení generují obdélníkový signál, který je závislý na směru otáčení. Enkodér generuje dva obdélníkové průběhy fázově posunuté o 90° . Pak jednoduše při jedné hraně jednoho průběhu čteme stav druhého průběhu a podle toho, zda je v logické 1 nebo 0 přičítáme nebo odečítáme. [11] Princip rotačního enkodéru můžeme vidět na obrázku 5.4.



Obr. 5.4: Princip rotačního enkodéru (převzato z [11])

Impedanční přizpůsobení

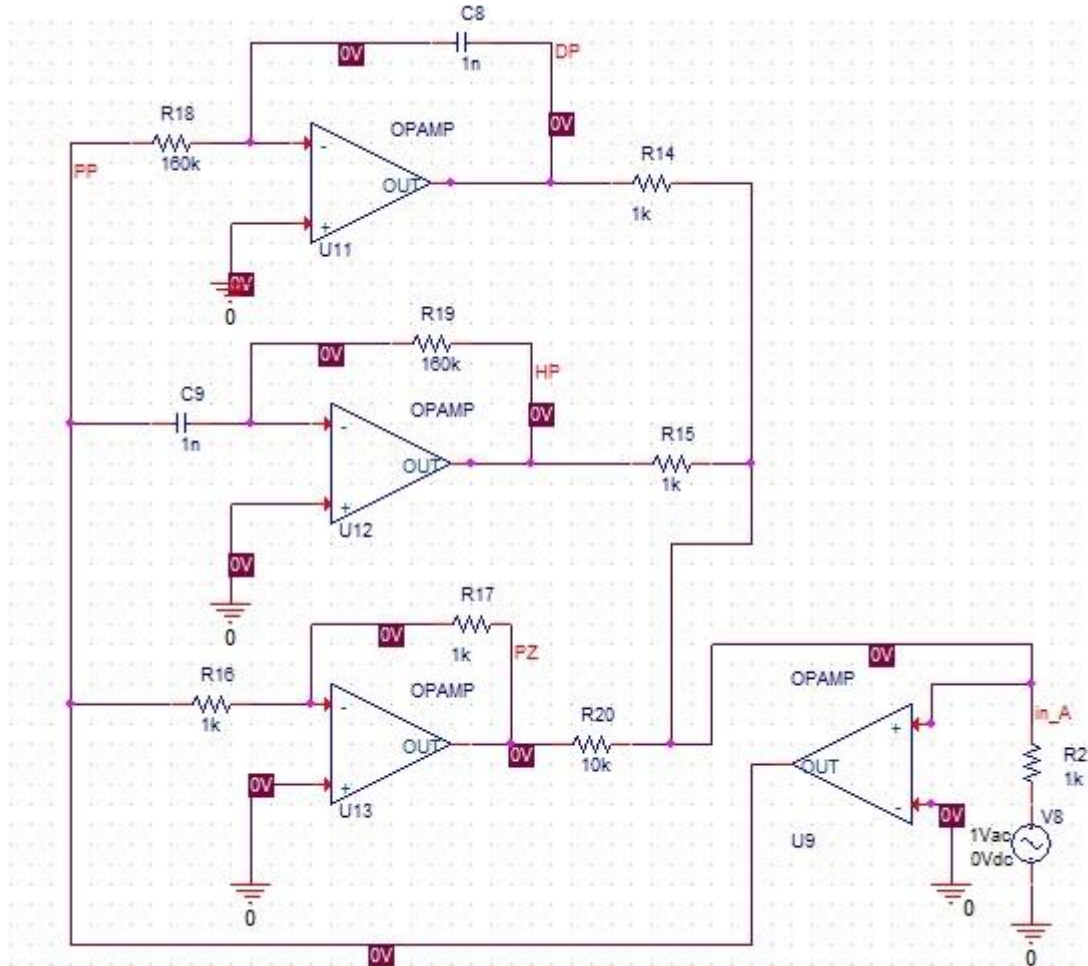
Navržený filtr má impedanční přizpůsobení přepínatelné mezi dvěma stavy. První je přizpůsobení ke koaxiálnímu kabelu s impedancí 50Ω (na vstupu i výstupu filtru bude impedance 50Ω). Druhý stav je velmi vysoká impedance na vstupu filtru, která je důležitá pro co nejnižší zatěžování předcházejících bloků a velmi nízká impedance na výstupu filtru. Toto přepínání je zajištěno pomocí jazýčkových relé.

Jazýčková spínací relé

Princip funkce těchto relé spočívá v deformaci magneticky vodivých jazýčků v magnetickém poli. Tyto jazýčky jsou uloženy ve skleněné trubici naplněné inertním plynem. Vložením do magnetického pole cívky se jazýčky zmagnetizují. Pokud bude toto pole větší než mechanická pevnost jazýčků, jazýčky se ohnou a spínač sepne. S ohledem na malé proudové zatížení výstupních portů mikrokontroléru jsou relé spínána pomocí bipolárních tranzistorů.

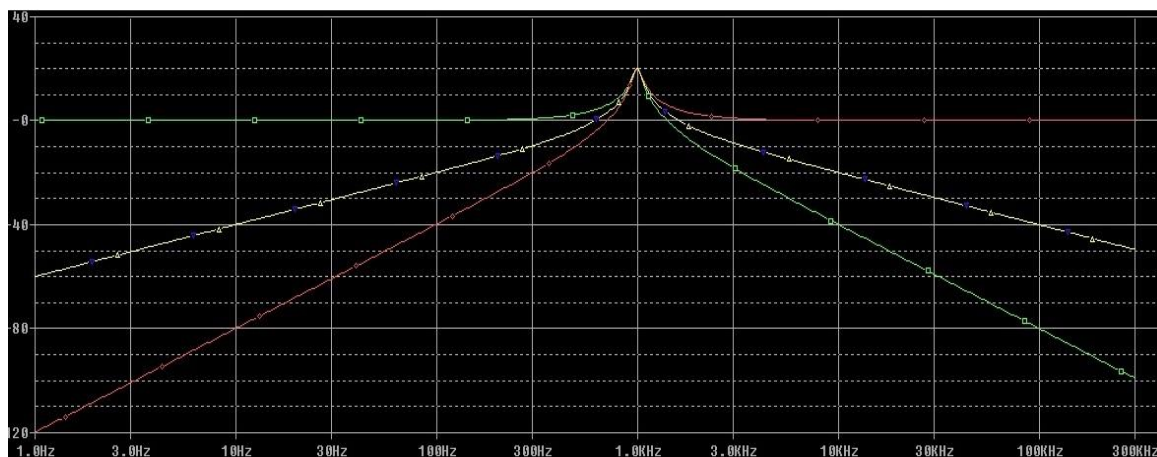
5.3 Simulace zapojení

Simulace vybraného zapojení byly provedeny v programu OrCAD Capture za pomoci simulačního modulu PSpice. Simulované zapojení můžeme vidět na obrázku 5.5.

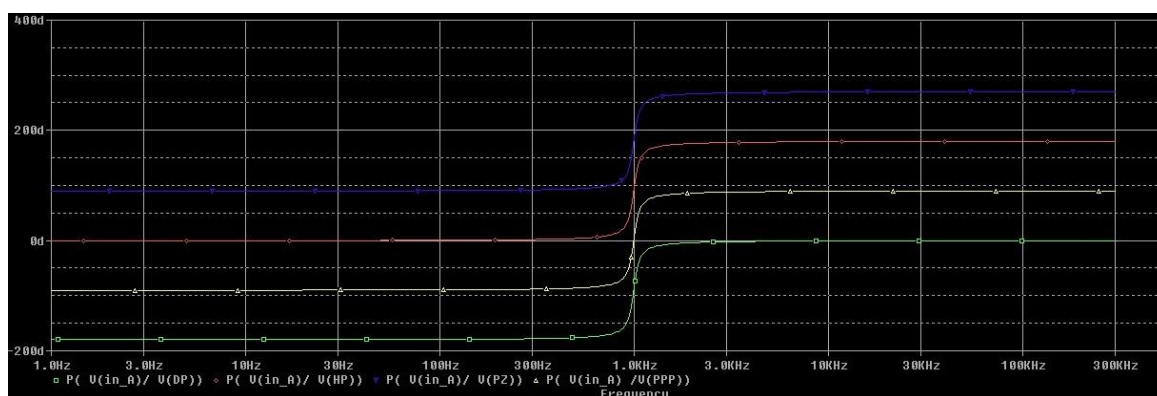


Obr. 5.5: Simulované zapojení

Pro demonstraci byl vybrán mezní kmitočet 1 kHz. Výsledné charakteristiky ovšem neodpovídají očekávaným výsledkům. Modulová charakteristika (obr. 5.6) pásmové zadržky přesně kopíruje modulovou charakteristiku pásmové propusti, což odporuje uvedené teorii. Fázová charakteristika pásmové zadržky má taktéž totožný průběh jako fázová charakteristika pásmové propusti s tím rozdílem, že je posunutá o 180°. Další zajímavostí modulových charakteristik jsou „špičky“, které se objevují v oblasti mezního kmitočtu. Z těchto důvodů bude zajímavé pozorovat výsledné naměřené charakteristiky těchto filtrů. Zbylé charakteristiky už ovšem teorii odpovídají. Strmost filtrů dolní a horní propusti je 40 dB na dekádu a strmost filtru typu pásmová propust je 20 dB na dekádu. Fázové charakteristiky (obr. 5.7) se u těchto filtrů shodují s teorií.



Obr. 5.6: Modulové charakteristiky filtrů



Obr. 5.7: Fázové charakteristiky filtrů

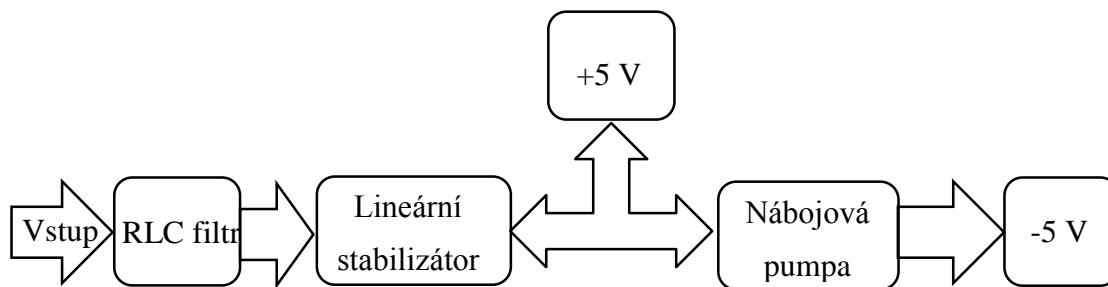
5.4 Návrh desky plošných spojů

Za účelem co největší minimalizace byla deska navrhnutá jako čtyřvrstvá a většina vybraných součástek je typu SMD. Standardní velikost pouzder u pasivních součástek je 0603.

Při návrhu desky byla snaha o dodržení základních návrhových pravidel, jako je umístění blokovacích kondenzátorů co nejblíže k napájecím vstupům integrovaných obvodů, co nejkratší signálové cesty a využívání rozlévání mědi k odrušení součástek. Deska plošných spojů byla navrhnutá v programu EAGLE a výsledný layout je možné si prohlédnout v příloze C.

6 NAPÁJECÍ ČÁST FILTRU

Zařízení bude napájeno ze sítě pomocí externího adaptéru obsahující spínaný zdroj s výstupním napětím 9 V. Pro odstranění případného rušení spínaného zdroje je na vstupu zařízení pasivní RLC filtr typu dolní propust. Poté je vstupní napětí stabilizováno lineárním stabilizátorem na hodnotu +5V. Napětí -5V pro symetrické napájení operačních zesilovačů je zajištěno pomocí nábojové pumpy. Blokové schéma napájecí části je na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Blokové schéma napájecí části

Lineární stabilizátor

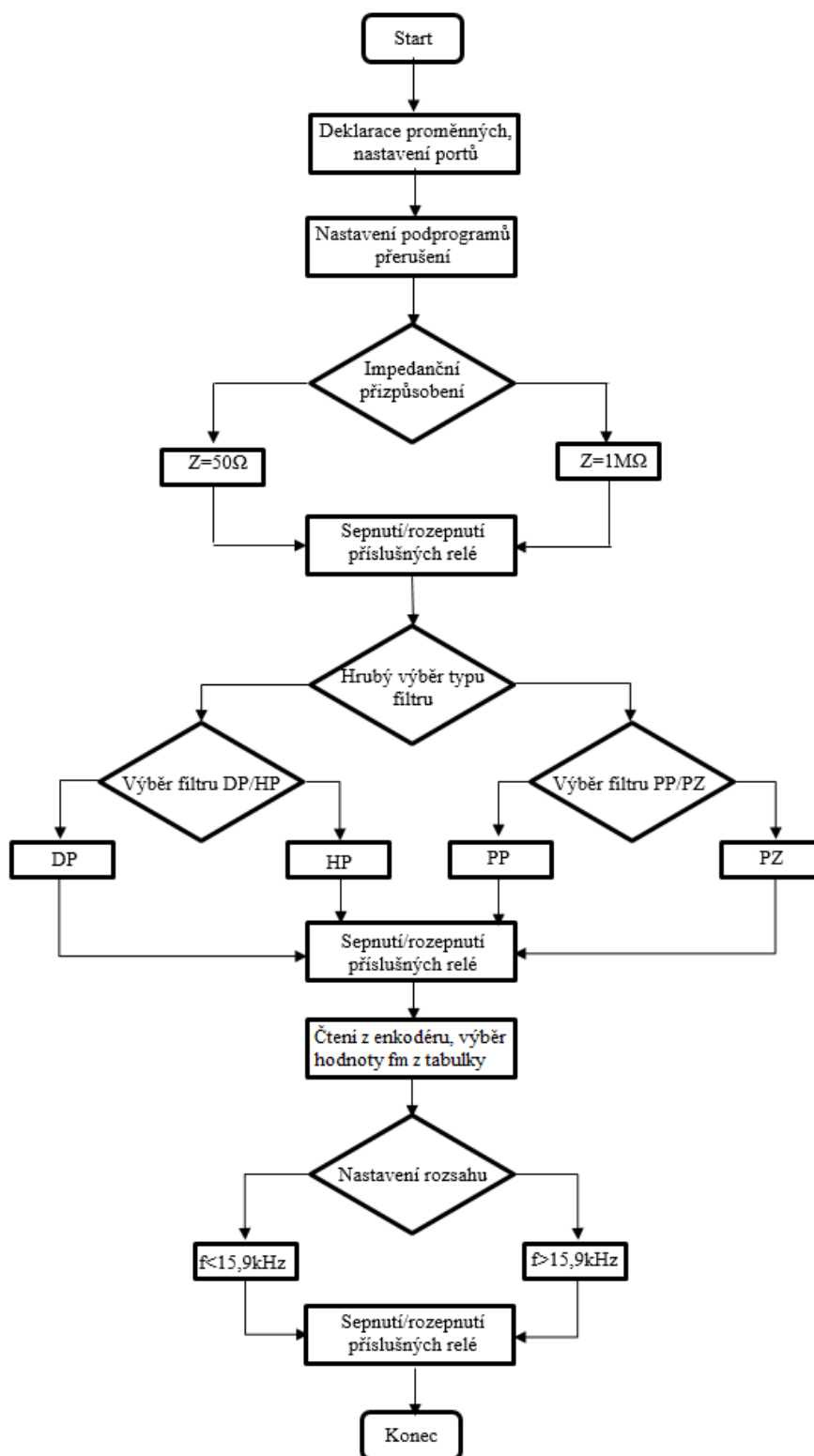
Lineárním stabilizátorem je ještě nutno vstupní napětí stabilizovat na hodnotu určenou k napájení integrovaných obvodů uvnitř zařízení (MCU, D/A převodník...). Výhoda těchto stabilizátorů je ta, že jejich výstupní napětí je takřka nezávislé na změně vstupního napětí. Lineární stabilizátory mají v porovnání se spínanými měniči DC–DC malou účinnost. Konstantní rozdíl napětí mezi vstupem a výstupem je mezi emitorem (source) a kolektorem (drain) tranzistoru, který pracuje v lineárním režimu a na kterém se v závislosti na odebíraném proudu přeměňuje nevyužitý výkon na teplo. Proto je nutné při návrhu počítat s maximálním ztrátovým výkonem a dle teplotních parametrů pouzdra, které stanoví výrobce v katalogovém listu. Je nutné určit, zda se „obvod uchladí sám“, nebo bude nutné připojit chladič či využít pro chlazení měď na desce nebo kombinaci obojího. V tomto případě bylo nutné napětí stabilizovat z hodnoty +9 V na +5 V. Na stabilizátoru bude tedy konstantní úbytek napětí +4 V. Byl zvolen stabilizátor LM7805, který má minimální úbytek napětí na tranzistoru pro práci v lineárním režimu +2 V.

Nábojová pumpa

Nábojová pumpa je druh bezindukčního stejnosměrného měniče, který používá kondenzátory pro uskladnění a následný převod elektrické energie. Byla použita nábojová pumpa MAX889SESA+ od firmy MAXIM INTEGRATED [4]. Její parametry jsou následující:

- Napájecí napětí: 2,7 – 5,5 V
- Výstupní napětí -5,5 – -2,2 V
- Výstupní proud 200 mA
- Rozsah pracovních teplot: -40 °C až 85 °C
- Dostupná pouzdra: SOIC-8

7 NÁVRH SOFTWAREVÉ ČÁSTI FILTRU



Obr. 7.1: Vývojový diagram programu

Program pro řízení mikrokontroléru Atmel ATmega64 je napsán ve vývojovém prostředí AVR Studio 7.0, které je volně dostupné na stránkách společnosti Atmel [8]. Komunikace mezi mikrokontrolérem a vývojovým prostředím probíhá pomocí programátoru využívající JTAG rozhraní, je tedy možné i ladění aplikace.

Program se skládá z několika částí – nastavení portů, registrů a podprogramů přerušení, ovládání tlačítek a ovládání rotačního enkodéru. Podrobnější popis programu je vidět na vývojovém diagramu (obrázek 7.1).

Jelikož jsou k dispozici pouze dvě ovládací tlačítka a dvouřádkový LCD displej, je ovládání programu následující. Po provedení startovní procedury se na LCD displeji zobrazí menu pro výběr impedančního přizpůsobení. První tlačítko potvrdí výběr na prvním řádku displeje (50 OHM IMP), druhé tlačítko potvrdí výběr na druhém řádku displeje (1 MEGA IMP). Po vybrání impedančního přizpůsobení se zobrazí menu pro výběr typu filtru. Nejprve se musí provést výběr typů filtrů „nahrubo“ mezi dvojicemi DP, HP (první řádek na displeji, výběr pomocí prvního tlačítka) a PP, PZ (druhý řádek na displeji, výběr pomocí druhého tlačítka). Po stisknutí tlačítka se objeví menu už konkrétního výběru typu filtru (výběr mezi DP a HP nebo výběr mezi PP a PZ). Ovládání menu je stejné jako v předchozích případech. Po výběru konkrétního typu filtru se na displeji zobrazí menu pro nastavení mezního kmitočtu. Toto nastavení se provádí pomocí rotačního enkodéru. Poté se po stisku libovolného tlačítka vrátí výběr zpět na nastavení impedančního přizpůsobení.

7.1 Důležité části řídicího programu

V této kapitole budou pro ilustraci uvedeny důležité části řídicího programu.

7.1.1 Volba typu impedančního přizpůsobení

Program nejprve zajistí vypsání správného výběrového menu (obr. 7.2) a poté v závislosti na tom, které tlačítko bylo stisknuto, vyšle na šestý a sedmý pin portu B logickou nulu nebo logickou jedničku, které potom zajistí sepnutí nebo rozepnutí příslušného relé.

```
case IMPEDANCE_SET:
    PORTB = 0;
    PORTA = 0;
    button_state = 0;
    if(print_menu(impedance_menu,2) == MENU_OK)
    {
        while(button_state == 0);
        button_decoupling();
        if(button_state == BUTTON1_SET)
        {
            PORTB = (0<<7) | (1<<6); // when button 1 set select 50 ohm
            impedance
            imp_type = IMP_50;
        }
        if(button_state == BUTTON2_SET)
        {
            PORTB = (1<<7) | (0<<6); // when button 2 set select high
            input impedance and low output impedance
        }
    }
}
```

```

        imp_type = IMP_HIGH;
    }
    button_state = 0;
    state = FILTER_TYPE;
} else
{
    state = ERROR;
}
break;

```



Obr. 7.2: Výběr impedančního přizpůsobení

7.1.2 Volba typu filtru

Program nejprve zajistí vypsání správného výběrového menu (obr. 7.3). Poté v závislosti na tom, které tlačítko bylo stisknuto, vypíše menu pro výběr mezi DP, HP (obr. 7.4) a PP, PZ (obr. 7.5). Po stisknutí příslušného tlačítka vyše na druhý, třetí, čtvrtý a pátý pin portu B logickou nulu nebo logickou jedničku, které pak zapříčiní sepnutí nebo rozepnutí příslušného relé.

```

case FILTER_TYPE:
    button_state = 0x0;
    if(print_menu(filter_menu, 2) == MENU_OK)
    {
        while(button_state == 0x0);
        button_decoupling();
        if(button_state == BUTTON1_SET)
        {
            state = FILTER_LPHP;
        }
        if(button_state == BUTTON2_SET)
        {
            state = FILTER_BPBS;
        }
        button_state = 0;
    } else
    {
        state = ERROR;
    }
break;
case FILTER_LPHP:
    button_state = 0x0;

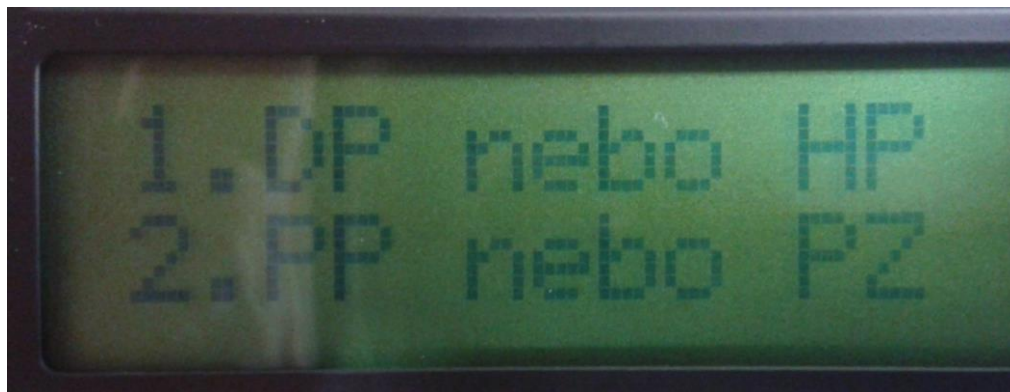
```

```

if(print_menu(filter_menu1,2) == MENU_OK)
{
    while(button_state == 0);
    button_decoupling();
    if(button_state == BUTTON1_SET) //select low pass
    {
        temp2 = PORTB | (0<<5) | (0<<4) | (0<<3) | (1<<2);
        filter_type = LOW_PASS;
    }
    if(button_state == BUTTON2_SET) //select high pass
    {
        temp2 = PORTB | (0<<5) | (0<<4) | (1<<3) | (0<<2);
        filter_type = HIGH_PASS;
    }

    PORTB = temp2;
    button_state =0;
    state = ENCODER_SET;
}else
{
    state = ERROR;
}
break;
case FILTER_BPBS:
    lcd_clrscr();
    lcd_firstline();
    button_state = 0x0;
    if(print_menu(filter_menu2,2) == MENU_OK)
    {
        while(button_state == 0x0);
        button_decoupling();
        if(button_state == BUTTON1_SET) //select band pass
        {
            temp2 = PORTB | (0<<5) | (1<<4) | (0<<3) | (0<<2);
            filter_type = BAND_PASS;
        }
        if(button_state == BUTTON2_SET) //select band stop
        {
            temp2 = PORTB | (1<<5) | (0<<4) | (0<<3) | (0<<2);
            filter_type = BAND_STOP;
        }
        PORTB = temp2;
        button_state =0;
        state = ENCODER_SET;
    }else
    {
        state = ERROR;
    }
break;

```

Obr. 7.3: Výběr typu filtru



Obr. 7.4: Výběr PZ nebo PP



Obr. 7.5: Výběr DP nebo HP

7.1.3 Nastavení mezního kmitočtu filtru

Program vypíše finální menu (obr. 7.6), kde lze pomocí rotačního enkodéru měnit nastavovaný kmitočet. Program nejprve vyhodnotí, v jakém rozsahu se nastavovaný kmitočet nachází, a sepne nebo rozepne příslušná relé vysláním logické nuly nebo jedničky na nultý a první pin portu B. Dále program vyšle příslušnou bitovou hodnotu na oba kanály D/A převodníku. Poté se po stisknutí libovolného tlačítka program vrátí zpět na výchozí obrazovku s výběrem impedančního přizpůsobení.

```
case ENCODER_SET:
    lcd_clrscr();
    lcd_secondline();
    sprintf(second_line,"%s
%s\n",imp_list[imp_type],filter_list[filter_type]);
    lcd_puts(second_line);
    while(button_state == 0x0)
    {
        lcd_firstline();
        if(encoder_value>255)
        {
            temp = ((encoder_value&0xFF)>>8)|0;
            temp2 = PORTB | (1<<0) | (1<<1);
            PORTB = temp2;
        }else
        {
```



```

        temp = encoder_value & 0xFF;
        temp2 = PORTB | (0<<0) | (0<<1);
        PORTB = temp2;
    }
    set_frequency = freq[encoder_value];
    PORTD|= 0 <<4;
    PORTA = (char)temp;
    PORTD|= 1 <<4;
    PORTA = (char)temp;
    sprintf(first_line,"FREQ. %7lu Hz \n",set_frequency);
    lcd_puts(first_line);
}
lcd_clrscr();
button_decoupling();
state = IMPEDANCE_SET;
break;

```



Obr. 7.6: Finální zobrazení displeje

8 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vysvětlit základní principy kmitočtových filtrů, srovnání jednotlivých integrovaných obvodů a návrh vlastního uspořádání kmitočtového filtru.

Ze srovnání jednotlivých univerzálních integrovaných filtrů je patrné, že oblast jejich použití je velmi omezena. Hlavním omezujícím faktorem použití je značně omezený rozsah kmitočtového pásma, kde se dá filtr ladit, a dále skutečnost, že u většiny filtrů nelze realizovat všechny typy kmitočtových filtrů (DP, HP, PP, PZ).

Z možností elektronického ladění filtrů byly zváženy dvě hlavní metody, a to ladění pomocí digitálních potenciometrů a D/A převodníků. Pro realizaci byl vybrán způsob ladění pomocí D/A převodníků z důvodu menší chybovosti nastavovaného odporu.

Realizace zařízení se bohužel nezdařila v celém rozsahu. Ovládací část desky plošného spoje (LCD displej, tlačítka, enkodér, relé) funguje, ovšem filtrační část desky plošného spoje nikoliv. Důvody jsou dva. První důvod je nesprávné napájení operačních zesilovačů, které je navrženo na ± 5 V, ovšem napájení udávané výrobcem je $\pm 2,5$ V. Výrobce udává maximální rozdíl napětí mezi napájecími svorkami OZ $+5$ V. Zde je první chyba návrhu. Tato chyba lze vyřešit pouze přidáním stabilizátorů na $+2,5$ V a $-2,5$ V.

Ovšem i po přivedení správného napájecího napětí z externího zdroje přetrvával druhý problém – záporné stejnosměrné napětí, které bylo na výstupu vstupního napěťového sledovače. Po sérii pokusů lze toto chování vysvětlit přítomností parazitní smyčky, která přenáší část napájecího napětí do operačního zesilovače, ve kterém je následně zesíleno a posláno na výstup. Příčinou přítomnosti této smyčky může být vada mezi jednotlivými vrstvami na desce plošných spojů, ale jako pravděpodobnější se jeví chyba v návrhu layoutu zapříčiněná nedostatkem zkušeností návrháře. Z výše uvedených důvodů tedy nebylo možné realizovat samotné měření filtrů a diskutovat naměřené výsledky ze simulací. Opravit tuto chybu lze pouze úpravou layoutu desky plošných spojů. Pomocí při řešení tohoto problému by také mohlo zvolení operačních zesilovačů s nižší hodnotou GBWP.

Na desce plošných spojů jsou i menší kosmetické vady, na které se přišlo při oživování zařízení – ne moc vhodný konektor určený k připojení LCD displeje a nedostatečné ošetření zákmitů na enkodéru.

LITERATURA

- [1] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-730-0023-7.
- [2] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2009, 271 s. ISBN 978-80-7300-240-4.
- [3] KUBÁNEK, David a Kamil VRBA. *Použití digitálních potenciometrů k řízení parametrů kmitočtových filtrů* [online]. 2002 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02050/index.html>.
- [4] *Maxim Integrated* [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/en.html>
- [5] *Analog Devices* [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/index.html>
- [6] *Linear Technology* [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.linear.com/>
- [7] *Texas Instruments* [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/>
- [8] *Atmel* [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/>
- [9] NAVRÁTIL, Petr. Didaktická příručka pro vývojový kit s ATMEL. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 52 s.
- [10] VRBA, Kamil. *Konstrukce elektronických zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav telekomunikací, 2011, 250 s. ISBN 978-802144395-2
- [11] ATmega16 Microcontroller. Datasheet, Atmel Corp. [online]. 2010, poslední aktualizace 16.10.2013 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>
- [12] LT1090 Universal Dual Filter Building Block Datasheet, Linear Technology. [online]. 2009, [cit. 2014-12-14]. Dostupné z URL: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1060fb.pdf>
- [13] UAF42 Universal Active Filter, Texas Instruments. [online]. 2010, [cit. 2014-12-14]. Dostupné z URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uaf42.pdf>
- [14] LTC1562-2 Very Low Noise, Low distortion active RC Quad Universal Filter, Linear Technology. [online]. 1999, [cit. 2014-12-14]. Dostupné z URL: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/15622fa.pdf>
- [15] AD7528 CMOS Dual 8-Bit Buffered Multiplying DAC, Analog Devices. [online]. 1998, [cit. 2014-12-14]. Dostupné z URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7528.pdf
- [16] DS1803 Addressable Dual Digital Potentiometer, Maxim Intergrated. [online]. 2002, [cit. 2014-12-14]. Dostupné z URL: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1803.pdf>
- [17] JANEČKA, M. *ARC filtr kmitočtového analyzátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 76 s., 14 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. ing. Jiří Sedláček, CSc.
- [18] REZ, J. *Digitálně řízený filtr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2014. 92 s., 26 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Martin Friedl

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ALU	Aritmeticko-logická jednotka
ARC	Aktivní filtr RC
D	Bitové slovo
DP	Dolní propust
D/A	Digitálně-analogový
F_M	Mezní kmitočet
F_T	Tranzitní kmitočet operačního zesilovače
f_0	Mezní kmitočet
f_1	Kmitočet vstupního signálu
HP	Horní propust
K_u	Přenos harmonického signálu
OZ	Operační zesilovač
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zadrž
Q	Činitel jakosti filtru
R	Příčkový odpor rezistorové sítě R-2R
R_{DAC}	Ekvivalentní odpor D/A převodníku
U_1	Amplituda vstupního signálu
U_2	Amplituda výstupního signálu
Ω_0	Mezní úhlový kmitočet
φ	Fázový posuv
ω	Úhlový kmitočet
GBWP	Gain Bandwidth product

A VÝPOČTY PRO MEZNÍ KMITOČTY FILTRU

Tabulka mezních kmitočtů			
Bitová hodnota	$R_{DAC} [\Omega]$	Mezní kmitočet pro $C=1nF$ [Hz]	Mezní kmitočet pro $C=100pF$ [Hz]
1	2560000	62,16989965	621,6989965
2	1280000	124,3397993	1243,397993
3	853333,3333	186,5096989	1865,096989
4	640000	248,6795986	2486,795986
5	512000	310,8494982	3108,494982
6	426666,6667	373,0193979	3730,193979
7	365714,2857	435,1892975	4351,892975
8	320000	497,3591972	4973,591972
9	284444,4444	559,5290968	5595,290968
10	256000	621,6989965	6216,989965
11	232727,2727	683,8688961	6838,688961
12	213333,3333	746,0387957	7460,387957
13	196923,0769	808,2086954	8082,086954
14	182857,1429	870,378595	8703,78595
15	170666,6667	932,5484947	9325,484947
16	160000	994,7183943	9947,183943
17	150588,2353	1056,888294	10568,88294
18	142222,2222	1119,058194	11190,58194
19	134736,8421	1181,228093	11812,28093
20	128000	1243,397993	12433,97993
21	121904,7619	1305,567893	13055,67893
22	116363,6364	1367,737792	13677,37792
23	111304,3478	1429,907692	14299,07692
24	106666,6667	1492,077591	14920,77591
25	102400	1554,247491	15542,47491
26	98461,53846	1616,417391	16164,17391
27	94814,81481	1678,58729	16785,8729
28	91428,57143	1740,75719	17407,5719
29	88275,86207	1802,92709	18029,2709
30	85333,33333	1865,096989	18650,96989
31	82580,64516	1927,266889	19272,66889
32	80000	1989,436789	19894,36789
33	77575,75758	2051,606688	20516,06688
34	75294,11765	2113,776588	21137,76588
35	73142,85714	2175,946488	21759,46488
36	71111,11111	2238,116387	22381,16387
37	69189,18919	2300,286287	23002,86287
38	67368,42105	2362,456187	23624,56187
39	65641,02564	2424,626086	24246,26086
40	64000	2486,795986	24867,95986

41	62439,02439	2548,965885	25489,65885
42	60952,38095	2611,135785	26111,35785
43	59534,88372	2673,305685	26733,05685
44	58181,81818	2735,475584	27354,75584
45	56888,88889	2797,645484	27976,45484
46	55652,17391	2859,815384	28598,15384
47	54468,08511	2921,985283	29219,85283
48	53333,33333	2984,155183	29841,55183
49	52244,89796	3046,325083	30463,25083
50	51200	3108,494982	31084,94982
51	50196,07843	3170,664882	31706,64882
52	49230,76923	3232,834782	32328,34782
53	48301,88679	3295,004681	32950,04681
54	47407,40741	3357,174581	33571,74581
55	46545,45455	3419,34448	34193,4448
56	45714,28571	3481,51438	34815,1438
57	44912,2807	3543,68428	35436,8428
58	44137,93103	3605,854179	36058,54179
59	43389,83051	3668,024079	36680,24079
60	42666,66667	3730,193979	37301,93979
61	41967,21311	3792,363878	37923,63878
62	41290,32258	3854,533778	38545,33778
63	40634,92063	3916,703678	39167,03678
64	40000	3978,873577	39788,73577
65	39384,61538	4041,043477	40410,43477
66	38787,87879	4103,213377	41032,13377
67	38208,95522	4165,383276	41653,83276
68	37647,05882	4227,553176	42275,53176
69	37101,44928	4289,723076	42897,23076
70	36571,42857	4351,892975	43518,92975
71	36056,33803	4414,062875	44140,62875
72	35555,55556	4476,232774	44762,32774
73	35068,49315	4538,402674	45384,02674
74	34594,59459	4600,572574	46005,72574
75	34133,33333	4662,742473	46627,42473
76	33684,21053	4724,912373	47249,12373
77	33246,75325	4787,082273	47870,82273
78	32820,51282	4849,252172	48492,52172
79	32405,06329	4911,422072	49114,22072
80	32000	4973,591972	49735,91972
81	31604,93827	5035,761871	50357,61871
82	31219,5122	5097,931771	50979,31771
83	30843,37349	5160,101671	51601,01671
84	30476,19048	5222,27157	52222,7157
85	30117,64706	5284,44147	52844,4147
86	29767,44186	5346,611369	53466,11369
87	29425,28736	5408,781269	54087,81269
88	29090,90909	5470,951169	54709,51169

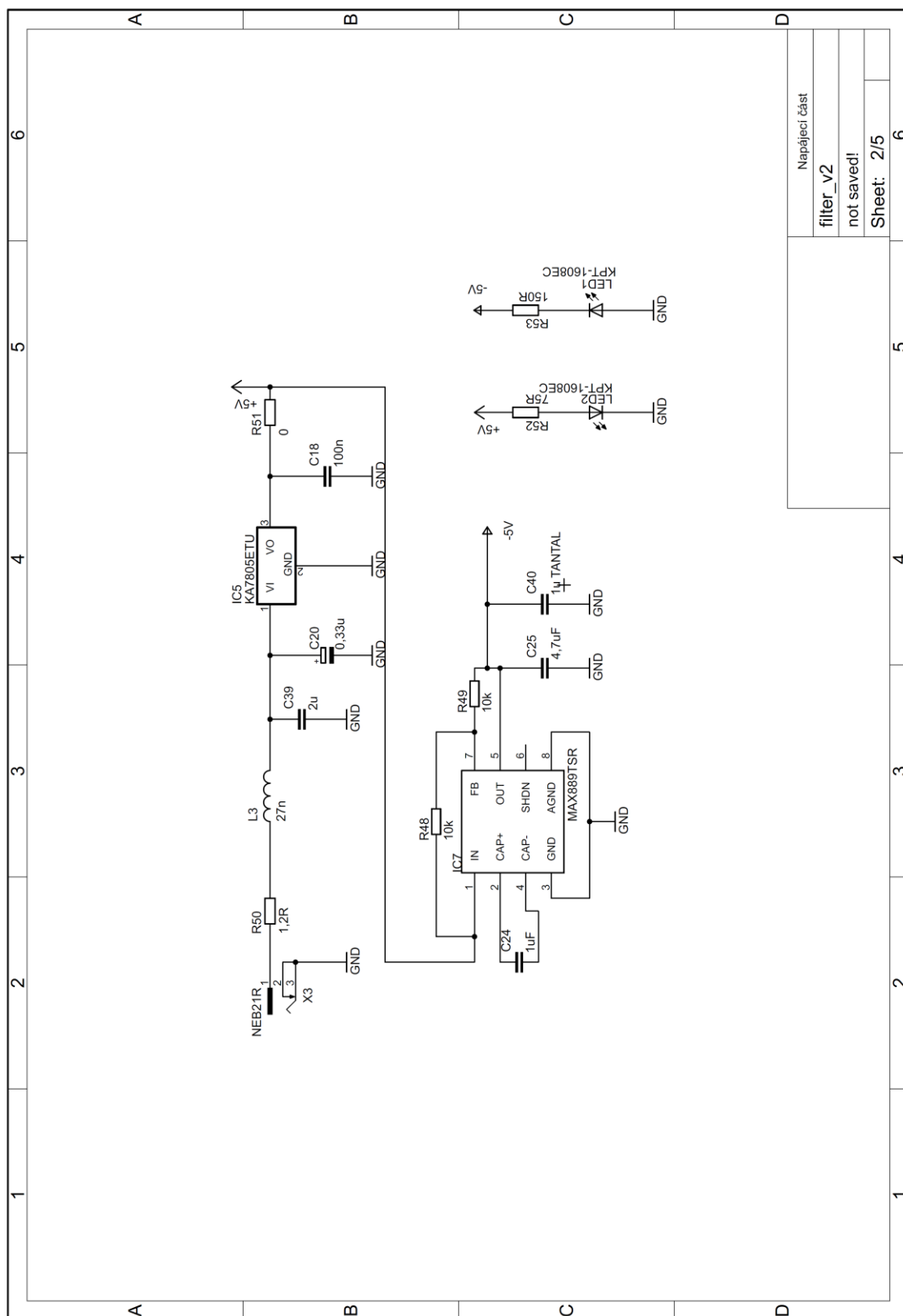
89	28764,04494	5533,121068	55331,21068
90	28444,44444	5595,290968	55952,90968
91	28131,86813	5657,460868	56574,60868
92	27826,08696	5719,630767	57196,30767
93	27526,88172	5781,800667	57818,00667
94	27234,04255	5843,970567	58439,70567
95	26947,36842	5906,140466	59061,40466
96	26666,66667	5968,310366	59683,10366
97	26391,75258	6030,480266	60304,80266
98	26122,44898	6092,650165	60926,50165
99	25858,58586	6154,820065	61548,20065
100	25600	6216,989965	62169,89965
101	25346,53465	6279,159864	62791,59864
102	25098,03922	6341,329764	63413,29764
103	24854,36893	6403,499663	64034,99663
104	24615,38462	6465,669563	64656,69563
105	24380,95238	6527,839463	65278,39463
106	24150,9434	6590,009362	65900,09362
107	23925,23364	6652,179262	66521,79262
108	23703,7037	6714,349162	67143,49162
109	23486,23853	6776,519061	67765,19061
110	23272,72727	6838,688961	68386,88961
111	23063,06306	6900,858861	69008,58861
112	22857,14286	6963,02876	69630,2876
113	22654,86726	7025,19866	70251,9866
114	22456,14035	7087,36856	70873,6856
115	22260,86957	7149,538459	71495,38459
116	22068,96552	7211,708359	72117,08359
117	21880,34188	7273,878258	72738,78258
118	21694,91525	7336,048158	73360,48158
119	21512,60504	7398,218058	73982,18058
120	21333,33333	7460,387957	74603,87957
121	21157,02479	7522,557857	75225,57857
122	20983,60656	7584,727757	75847,27757
123	20813,00813	7646,897656	76468,97656
124	20645,16129	7709,067556	77090,67556
125	20480	7771,237456	77712,37456
126	20317,46032	7833,407355	78334,07355
127	20157,48031	7895,577255	78955,77255
128	20000	7957,747155	79577,47155
129	19844,96124	8019,917054	80199,17054
130	19692,30769	8082,086954	80820,86954
131	19541,98473	8144,256854	81442,56854
132	19393,93939	8206,426753	82064,26753
133	19248,1203	8268,596653	82685,96653
134	19104,47761	8330,766552	83307,66552
135	18962,96296	8392,936452	83929,36452
136	18823,52941	8455,106352	84551,06352

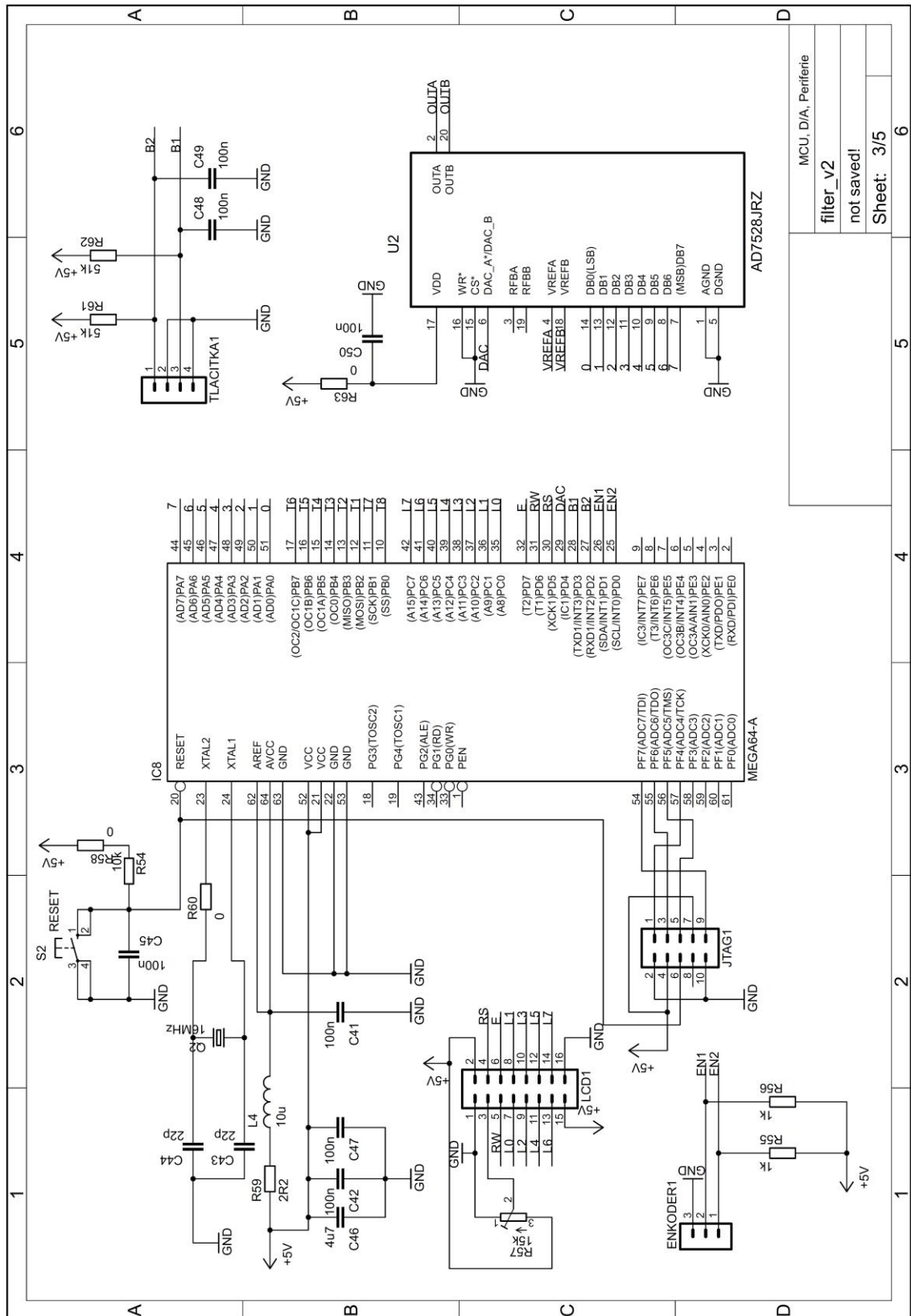
137	18686,13139	8517,276251	85172,76251
138	18550,72464	8579,446151	85794,46151
139	18417,26619	8641,616051	86416,16051
140	18285,71429	8703,78595	87037,8595
141	18156,02837	8765,95585	87659,5585
142	18028,16901	8828,12575	88281,2575
143	17902,0979	8890,295649	88902,95649
144	17777,77778	8952,465549	89524,65549
145	17655,17241	9014,635449	90146,35449
146	17534,24658	9076,805348	90768,05348
147	17414,96599	9138,975248	91389,75248
148	17297,2973	9201,145148	92011,45148
149	17181,20805	9263,315047	92633,15047
150	17066,66667	9325,484947	93254,84947
151	16953,64238	9387,654846	93876,54846
152	16842,10526	9449,824746	94498,24746
153	16732,02614	9511,994646	95119,94646
154	16623,37662	9574,164545	95741,64545
155	16516,12903	9636,334445	96363,34445
156	16410,25641	9698,504345	96985,04345
157	16305,73248	9760,674244	97606,74244
158	16202,53165	9822,844144	98228,44144
159	16100,62893	9885,014044	98850,14044
160	16000	9947,183943	99471,83943
161	15900,62112	10009,35384	100093,5384
162	15802,46914	10071,52374	100715,2374
163	15705,52147	10133,69364	101336,9364
164	15609,7561	10195,86354	101958,6354
165	15515,15152	10258,03344	102580,3344
166	15421,68675	10320,20334	103202,0334
167	15329,34132	10382,37324	103823,7324
168	15238,09524	10444,54314	104445,4314
169	15147,92899	10506,71304	105067,1304
170	15058,82353	10568,88294	105688,8294
171	14970,76023	10631,05284	106310,5284
172	14883,72093	10693,22274	106932,2274
173	14797,68786	10755,39264	107553,9264
174	14712,64368	10817,56254	108175,6254
175	14628,57143	10879,73244	108797,3244
176	14545,45455	10941,90234	109419,0234
177	14463,27684	11004,07224	110040,7224
178	14382,02247	11066,24214	110662,4214
179	14301,67598	11128,41204	111284,1204
180	14222,22222	11190,58194	111905,8194
181	14143,64641	11252,75184	112527,5184
182	14065,93407	11314,92174	113149,2174
183	13989,07104	11377,09164	113770,9164
184	13913,04348	11439,26153	114392,6153

185	13837,83784	11501,43143	115014,3143
186	13763,44086	11563,60133	115636,0133
187	13689,83957	11625,77123	116257,7123
188	13617,02128	11687,94113	116879,4113
189	13544,97354	11750,11103	117501,1103
190	13473,68421	11812,28093	118122,8093
191	13403,14136	11874,45083	118744,5083
192	13333,33333	11936,62073	119366,2073
193	13264,2487	11998,79063	119987,9063
194	13195,87629	12060,96053	120609,6053
195	13128,20513	12123,13043	121231,3043
196	13061,22449	12185,30033	121853,0033
197	12994,92386	12247,47023	122474,7023
198	12929,29293	12309,64013	123096,4013
199	12864,32161	12371,81003	123718,1003
200	12800	12433,97993	124339,7993
201	12736,31841	12496,14983	124961,4983
202	12673,26733	12558,31973	125583,1973
203	12610,83744	12620,48963	126204,8963
204	12549,01961	12682,65953	126826,5953
205	12487,80488	12744,82943	127448,2943
206	12427,18447	12806,99933	128069,9933
207	12367,14976	12869,16923	128691,6923
208	12307,69231	12931,33913	129313,3913
209	12248,80383	12993,50903	129935,0903
210	12190,47619	13055,67893	130556,7893
211	12132,70142	13117,84883	131178,4883
212	12075,4717	13180,01872	131800,1872
213	12018,77934	13242,18862	132421,8862
214	11962,61682	13304,35852	133043,5852
215	11906,97674	13366,52842	133665,2842
216	11851,85185	13428,69832	134286,9832
217	11797,23502	13490,86822	134908,6822
218	11743,11927	13553,03812	135530,3812
219	11689,49772	13615,20802	136152,0802
220	11636,36364	13677,37792	136773,7792
221	11583,71041	13739,54782	137395,4782
222	11531,53153	13801,71772	138017,1772
223	11479,82063	13863,88762	138638,8762
224	11428,57143	13926,05752	139260,5752
225	11377,77778	13988,22742	139882,2742
226	11327,43363	14050,39732	140503,9732
227	11277,53304	14112,56722	141125,6722
228	11228,07018	14174,73712	141747,3712
229	11179,0393	14236,90702	142369,0702
230	11130,43478	14299,07692	142990,7692
231	11082,25108	14361,24682	143612,4682
232	11034,48276	14423,41672	144234,1672

233	10987,12446	14485,58662	144855,8662
234	10940,17094	14547,75652	145477,5652
235	10893,61702	14609,92642	146099,2642
236	10847,45763	14672,09632	146720,9632
237	10801,68776	14734,26622	147342,6622
238	10756,30252	14796,43612	147964,3612
239	10711,29707	14858,60602	148586,0602
240	10666,66667	14920,77591	149207,7591
241	10622,40664	14982,94581	149829,4581
242	10578,5124	15045,11571	150451,1571
243	10534,97942	15107,28561	151072,8561
244	10491,80328	15169,45551	151694,5551
245	10448,97959	15231,62541	152316,2541
246	10406,50407	15293,79531	152937,9531
247	10364,37247	15355,96521	153559,6521
248	10322,58065	15418,13511	154181,3511
249	10281,1245	15480,30501	154803,0501
250	10240	15542,47491	155424,7491
251	10199,20319	15604,64481	156046,4481
252	10158,73016	15666,81471	156668,1471
253	10118,57708	15728,98461	157289,8461
254	10078,74016	15791,15451	157911,5451
255	10039,21569	15853,32441	158533,2441
256	10000	15915,49431	159154,9431

B SCHÉMATA ZAPOJENÍ



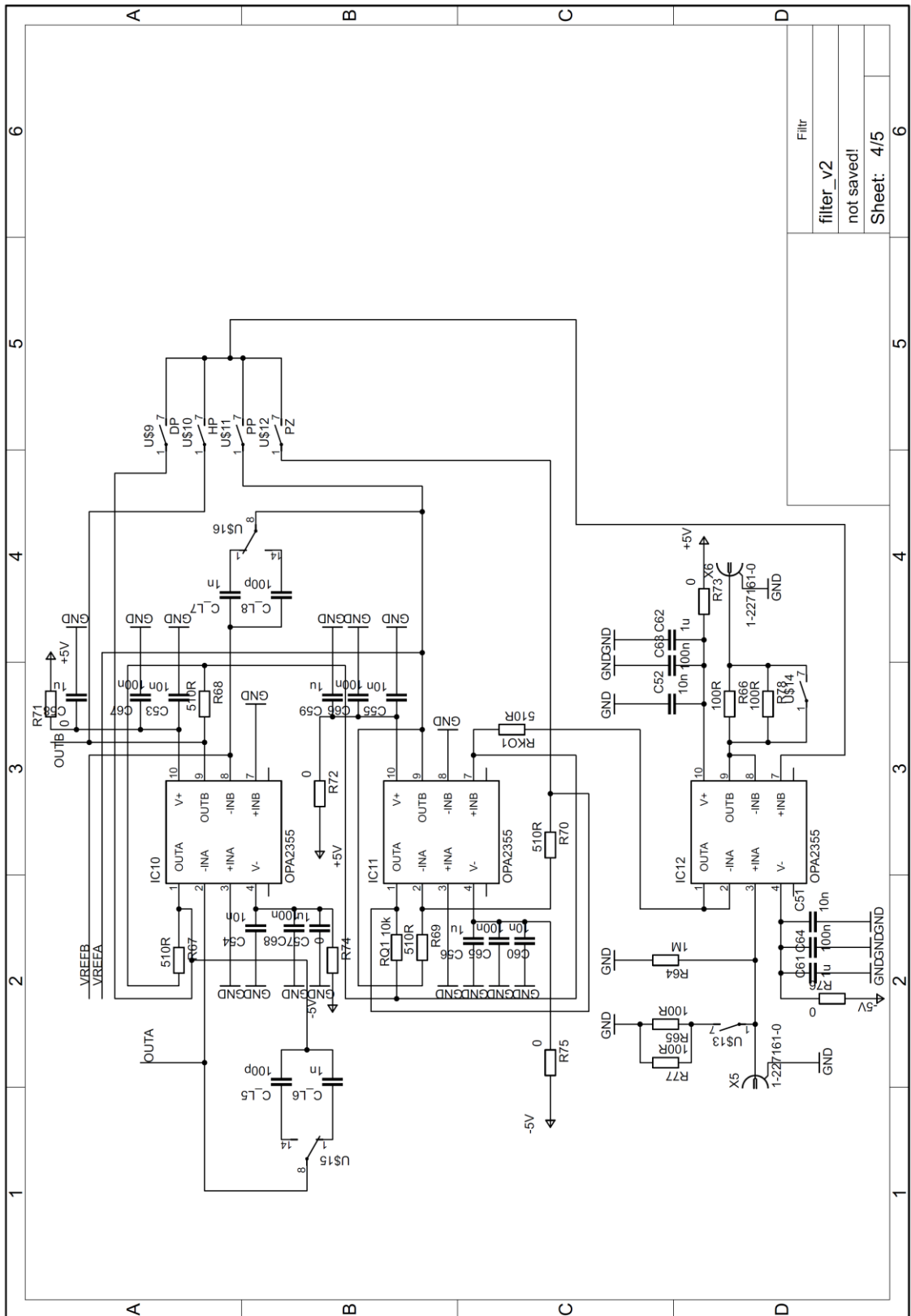


MCU, D/A, Periferie

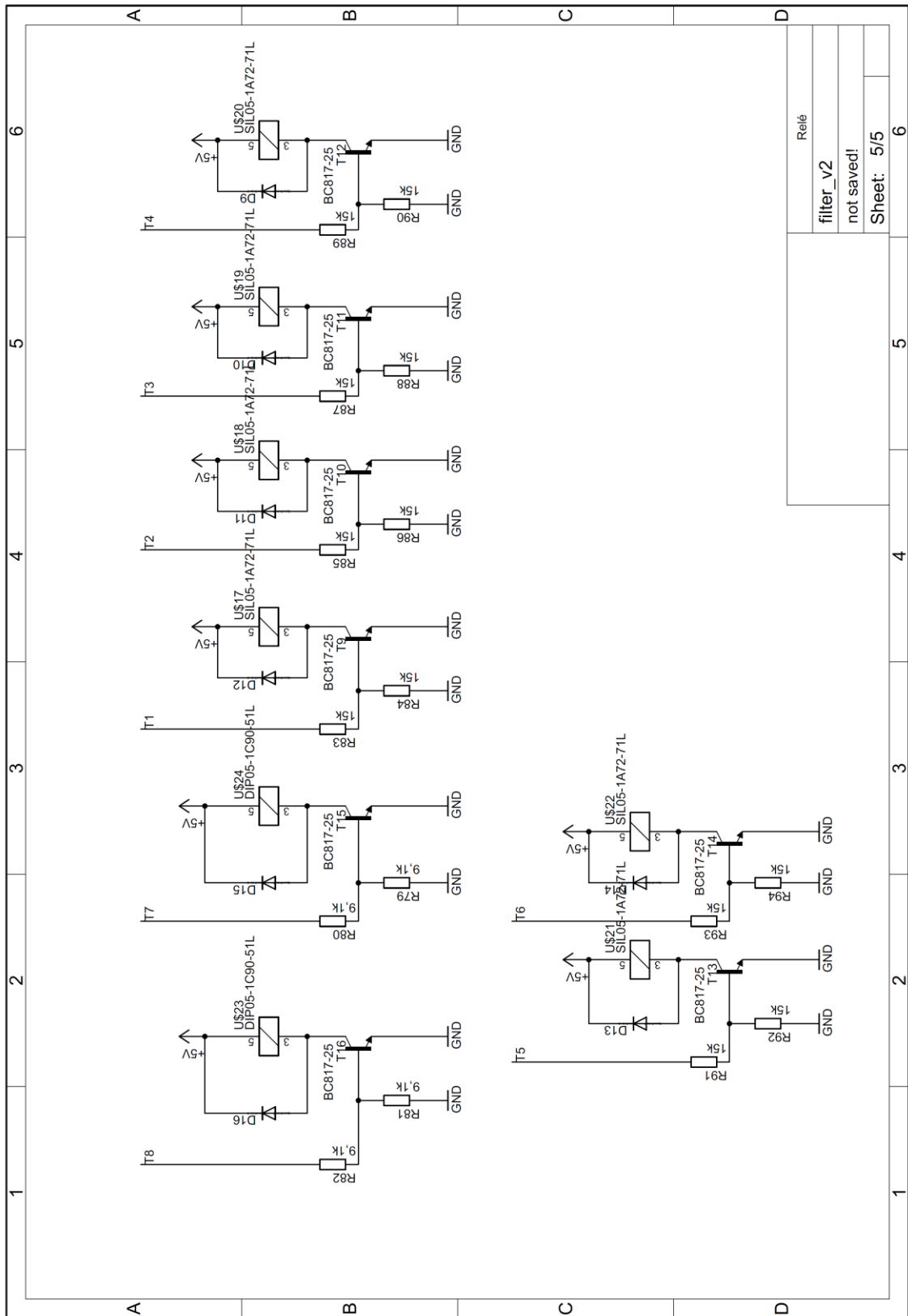
filter_v2

not saved!

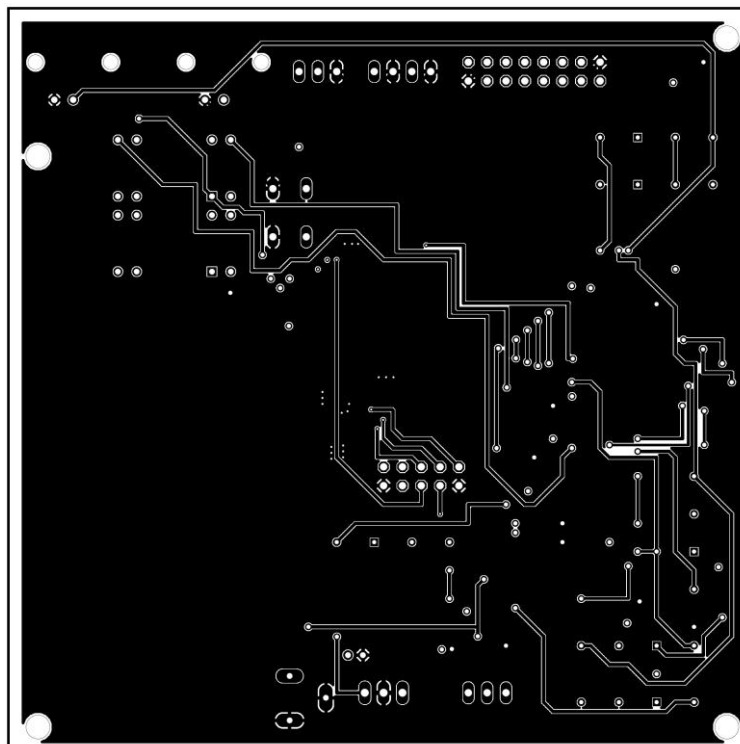
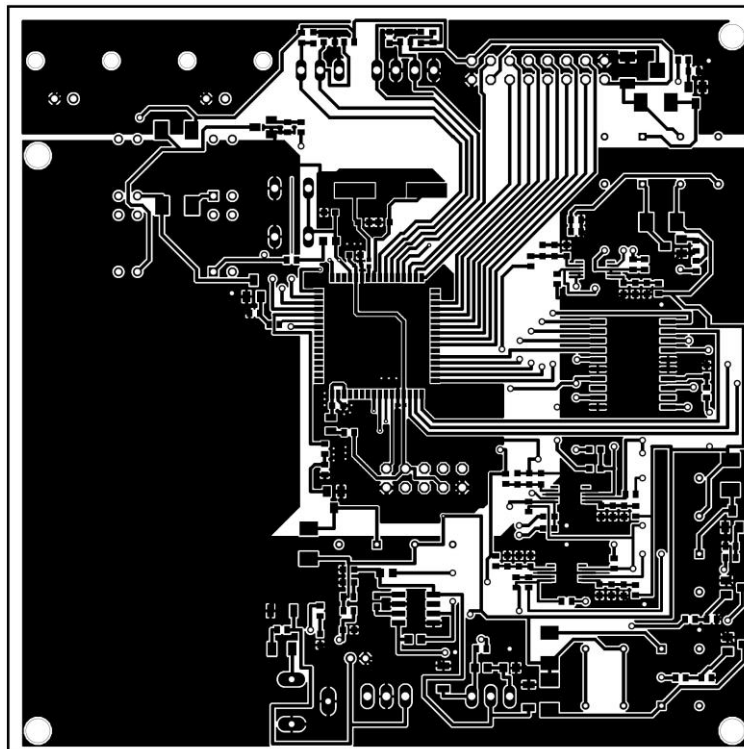
Sheet: 3/5

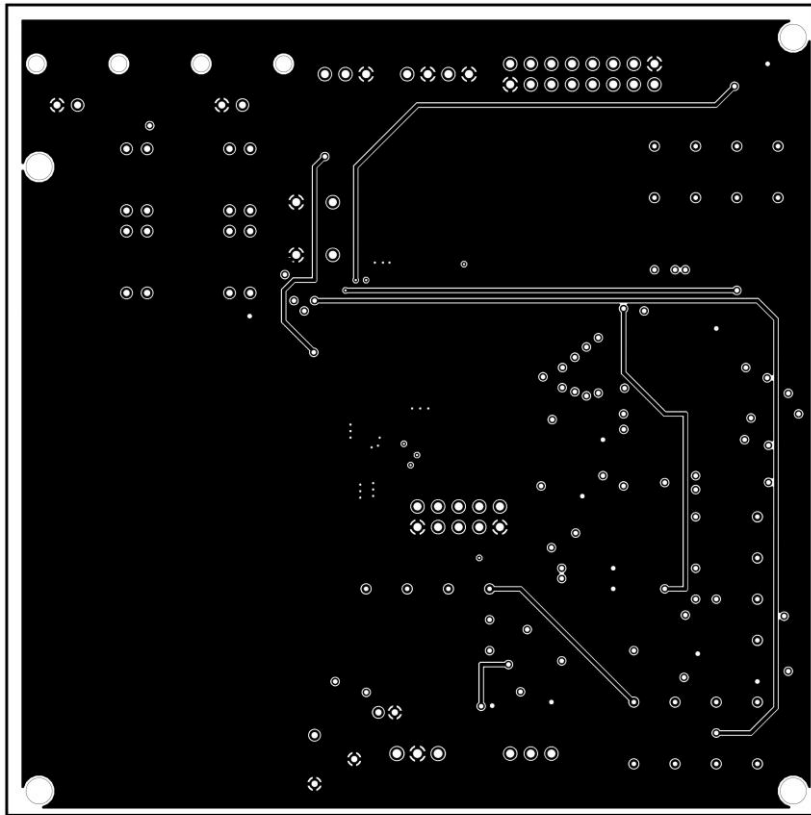
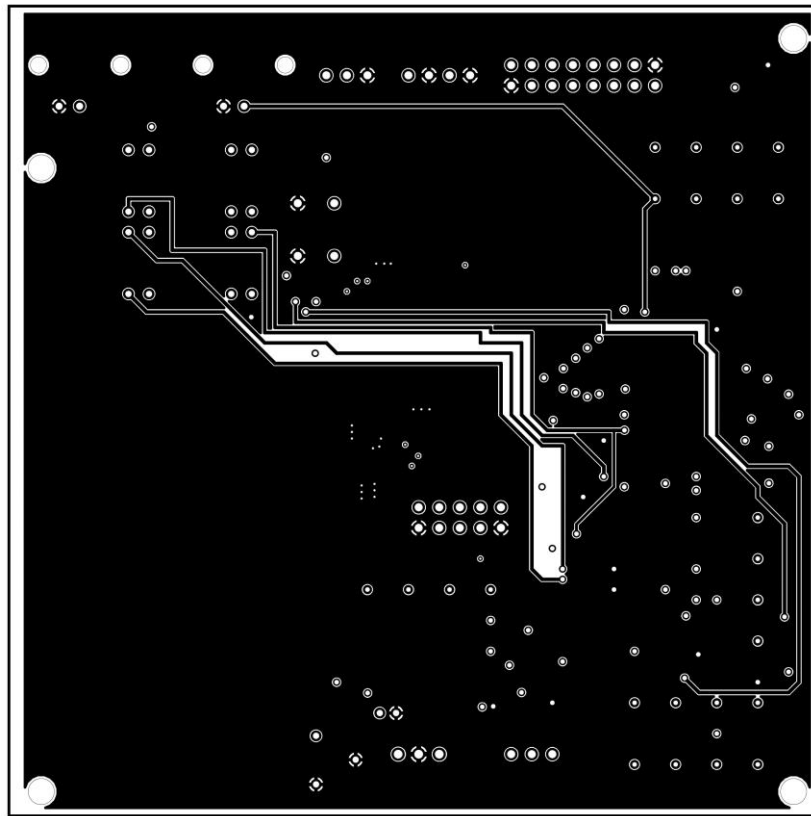


filter_v2	Filter
not saved!	
Sheet: 4/5	



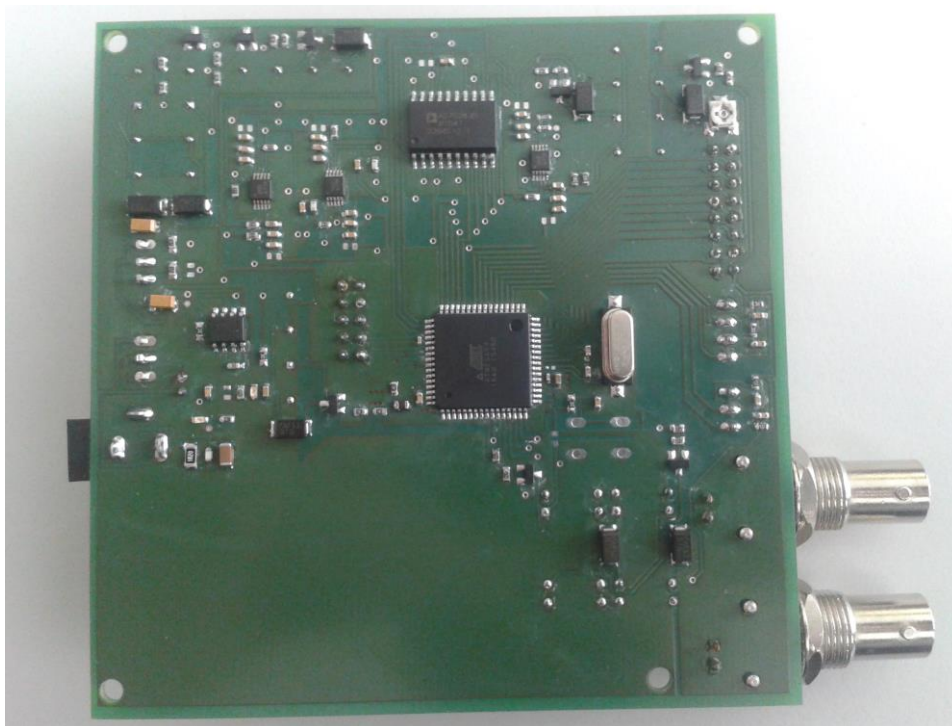
C LAYOUT VRSTEV BOTTOM, TOP, ROUTE2 A ROUTE15





D FOTOGALERIE

Osazená deska plošných spojů



Výsledný prototyp

